



Caracterización Experimental del Comportamiento Energético de Fachadas Ventiladas

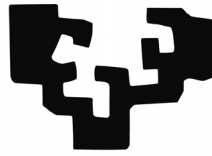
César Escudero Revilla

2016



Fotografía portada:
James Natchwey

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



*Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos*

Caracterización Experimental del Comportamiento Energético de Fachadas Ventiladas

César Escudero Revilla
(Ingeniero Industrial)

Universidad del País Vasco (UPV/EHU), en cumplimiento con los
requisitos para el grado de doctor dentro del programa de doctorado
Ingeniería Térmica del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

Directores de Tesis:
Dr. José María Pedro Sala Lizarraga
Dr. Koldobika Martín Escudero

Vitoria-Gasteiz, 2016



RESUMEN

En este trabajo de tesis se apuesta por una idea clara, el uso de fachadas activas en edificios para el aprovechamiento solar en la climatización de viviendas. De esta forma se introduce un nuevo componente de energía renovable que permite reducir el consumo de fuentes fósiles y alcanzar el objetivo de edificios de consumo nulo. Pero para que esta idea se haga realidad es necesario disponer de las herramientas adecuadas para poder hacer un diseño fiable de estos sistemas activos. Y estas herramientas son básicamente dos: un equipo de ensayo que permita estudiar experimentalmente el comportamiento energético, y unos modelos térmicos que permitan analizar el aporte real a escala de edificio. Por tanto, esta tesis se divide en dos partes claras que cubren ambos aspectos.

La primera parte de la tesis consiste en la puesta a punto de un equipo de caracterización en condiciones exteriores que permita realizar estudios con la misma fiabilidad que los ensayos normalizados. Para ello se emplea una celda *PASLINK*, equipo desarrollado por la actual red *DYNASTEE*. Estos equipos presentan las mejores prestaciones para realizar ensayos con probetas a escala real. En esta primera parte de la memoria se describe el proceso de instalación, calibración del equipo, y estudio de incertidumbres de los resultados mediante la ejecución de un ensayo de trazabilidad denominado *IQ-Test*. Este apartado pretende ser una guía para la realización de ensayos en condiciones exteriores ya que recoge todos los aspectos fundamentales: características básicas de los equipos e instrumentación, metodología de ensayo, y tratamiento de datos.

La segunda parte recoge los datos experimentales de los ensayos realizados a tres tipos de fachadas ventiladas. En el conjunto de probetas ensayadas se pretende registrar todas las variables de diseño posibles, pasando de hojas ligeras a pesadas, y de movimiento de aire por convección natural a forzado en la cámara de aire. Además se ensaya como referencia una fachada pasiva con y sin aislamiento térmico, que sirve de referencia y comparativa. Para el proceso de modelado se escoge la tipología de fachada ventilada ligera, por ser la más extendida en el sector de la edificación, tanto para obra de nueva construcción como para rehabilitación. Y se desarrolla un modelo matemático del comportamiento térmico de la fachada. En este paso no sólo es de interés el modelo final obtenido, sino que además el proceso de trabajo realizado sirve para el modelado de cualquier otro tipo de fachada activa. El modelo final se implementa en la herramienta *TRNSYS* para realizar el análisis energético a escala de edificio. Los resultados muestran el gran potencial que tienen las fachadas activas para la captación de energía solar mediante calor absorbido por una cortina de aire que sirve como fluido caloportador que posteriormente se puede emplear en la climatización de viviendas.

AGRADECIMIENTOS

Después de más de seis años en marcha hay muchas personas con las que he trabajado codo con codo y en consecuencia muchos agradecimientos que realizar.

El primero a José María Sala: gracias por brindarme la oportunidad de trabajar a tu lado. Como a muchos otros compañeros, jóvenes investigadores, me has dado la posibilidad y los medios para poder desarrollar un trabajo de calidad. Para todos nosotros eres una referencia como científico y como persona. Ese atreverme al primer encuentro en tu despacho para preguntarte si había alguna posibilidad de trabajo, ha sido la mejor decisión profesional que he tomado hasta el momento.

Después del peloteo de turno al jefe paso al resto de compañeros. Desde luego la lista empieza por Koldo Martín y por Iván Flores. Juntos empezamos a darle forma a lo que hoy es el Área Térmica. Con vosotros he aprendido casi todo lo que sé de energía en la edificación y cómo hacer bien las cosas. Nunca olvidaré esos años en la sala de control, las sesiones de Mark Anthony, los tres meses en Argentina, el roce de codo con codo, el txipirón,... A nuestro pequeño grupo se han ido sumando más personas: Daniel Pérez, un amigo que no se ha cortado en bajarme los humos en más de una ocasión; Carlos García, no hay palabras para definirte, el mundo no sería como es sin ti; Jon Martínez, que se marchó a Madrid pero que nos dio unos años mágicos y, desde luego Eider Iribar, Imanol Ruiz de Vergara y Juan María Hidalgo: el Área Térmica ha alcanzado los niveles de hoy en día gracias a vosotros, nunca habría terminado la tesis sin vuestro apoyo, ni con una comida en "el pakistani" saldaría mi deuda. Aitor Erkoreka: juntos le dimos vida a las celdas de ensayo, aunque me ganes al frontón es un placer discutir temas científicos contigo, sobre todo porque siempre tengo yo razón; Moises Odriozola, "Pipón", cómo me iba a olvidar de sus rancheras.

Por último gracias a los responsables del Departamento de Vivienda del Gobierno Vasco, en especial a los técnicos del LCCE, por su confianza y apuesta en nuestro trabajo. Sin su soporte sería impensable disponer de los medios para poder desarrollar proyectos con la calidad técnica que permite afrontar el Área Térmica, y por tanto poder realizar estudios de investigación como la presente tesis.

Gracias a todos, mi trabajo tiene una parte de cada uno de vosotros.

Índice



Introducción.....	3
I.1 Antecedentes.....	5
I.2 Fachadas ventiladas	6
I.2.1 Construcción, clasificación y tipologías	8
I.2.2 Estado del arte en la modelización térmica de fachadas ventiladas.....	16
I.3 Objetivos y alcance	20
Capítulo 1	23
1.1 Celda de ensayos PASLINK.....	25
1.1.1 Origen y desarrollo de las celdas PASLINK.....	25
1.1.2 Características de la celda PASLINK-EGUZKI.....	29
1.2 Instrumentación	39
1.2.1 Medida del flujo de calor, <i>HFS-Tiles</i>	39
1.2.2 Instrumentación de la sala de ensayos	44
1.2.3 Medida de las condiciones exteriores.....	47
1.3 Probetas de ensayo.....	49
1.3.1 Sistema de portaprobetas.....	49
1.3.2 Construcción de las muestras	52
1.3.3 Instrumentación específica de las muestras.....	54
Capítulo 2.....	61
2.1 Metodología de calibración	63
2.1.1 Rutina de ensayo.....	64
2.1.2 Medida del flujo de la envolvente	66
2.1.3 Correcciones para el muro de calibración.....	72
2.2 Resultados de ensayo	74
2.2.1 Medida de las infiltraciones	74
2.2.2 Flujos de calor.....	75
2.2.3 Temperaturas	84
2.2.4 Factores de calibración	88
2.3 Modelos matemáticos de la celda	90
2.3.1 Herramientas de identificación de parámetros	90
2.3.2 Modelos de la celda	99
2.3.3 Modelo del muro de calibración.....	121
Capítulo 3.....	135
3.1 Ensayo de trazabilidad <i>IQ-Test</i>	137
3.2 Metodología del ensayo de trazabilidad	141
3.2.1 Descripción de la muestra	141
3.2.2 Procedimiento de ensayo.....	148
3.3 Datos experimentales.....	151
3.3.1 Muro opaco	151
3.3.2 Ventana	165

3.4 Modelos matemáticos de los componentes.....	175
3.4.1 Modelo del muro opaco	175
3.4.2 Modelo de la ventana	188
3.5 Resultados del ensayo de trazabilidad.....	193
3.5.1 Análisis estadístico.....	193
3.5.2 Valoración final	202
Capítulo 4	203
4.1 Construcción e instrumentación de las muestras.....	205
4.1.1 Muro base.....	206
4.1.2 Fachada ventilada ligera	210
4.1.3 Fachada ventilada pesada	221
4.1.4 Fachada ventilada forzada	227
4.2 Datos experimentales	236
4.2.1 Muro base.....	236
4.2.2 Fachada ventilada ligera	245
4.2.3 Fachada ventilada pesada	267
4.2.4 Fachada ventilada forzada	287
Capítulo 5	301
5.1 Modelo del muro base.....	303
5.1.1 Modelo del muro base sin aislamiento.....	303
5.1.2 Modelo del muro base con aislamiento	307
5.2 Modelo de la fachada ventilada de tiro natural	309
5.2.1 Modelos convencionales.....	309
5.2.2 Modelos CFD probeta de fachada ventilada	319
5.2.3 Modelo experimental de fachada ventilada	331
Capítulo 6	353
6.1 Modelo del edificio	355
6.1.1 Características constructivas	355
6.1.2 Capacidades térmicas de los espacios, ventilación y cargas internas.....	362
6.1.3 Modelo del edificio con fachada ventilada.....	365
6.2 Resultados	373
6.2.1 Demanda del edificio sin rehabilitar.....	374
6.2.2 Demanda del edificio rehabilitado.....	378
Conclusiones.....	399
C.1 Aportaciones y conclusiones.....	401
C.2 Futuras líneas de investigación.....	410
Bibliografía.....	417

Introducción





I.1 Antecedentes

Edificios que no consuman energía primaria, y que estos edificios sean una realidad a corto plazo, es el compromiso tecnológico en el sector energético de la edificación. Pero hay que tener en cuenta que el consumo de energía en un edificio procede de diferentes orígenes, por un lado, los consumos asociados a los sistemas generales, como ascensores, iluminación, etc..., y por otro lado, los consumos asociados a la climatización de las viviendas. Es en este segundo apartado donde se basa el presente trabajo de investigación, y más concretamente, en el estudio y control de la demanda.

Los esfuerzos serios por reducir el derroche de energía en climatización en el parque edificatorio son relativamente recientes. Hasta bien entrado el segundo cuarto de siglo pasado no se comienzan a implantar medidas eficientes para controlar y reducir dicho consumo de energía. Estas medidas parten de las exigencias normativas, primero a nivel internacional y, posteriormente, a nivel nacional y regional. Las directivas europeas y su trasposición a códigos técnicos de la edificación, son por todos conocidas, y su evolución en la última década ha sido la piedra angular para el cambio en la mentalidad del sector de la edificación y en la actual forma de diseñar y construir.

El primer impulso al ahorro energético consistió en la limitación de la demanda mediante el aumento de las exigencias en el aislamiento térmico de la envolvente del edificio. Esta actuación es la que presenta mejor ratio eficiencia-coste, y su implantación en la primera década del presente siglo, ha permitido reducir prácticamente a la mitad las demandas. Sin embargo, existe un espesor óptimo de aislamiento, función de las condiciones climatológicas, a partir del cual, la tasa de eficiencia en la reducción de demanda se estanca. Estos espesores óptimos ya se están alcanzando en la actualidad, y por tanto, es una herramienta bastante agotada, o con pequeños márgenes de desarrollo. Además, la mejora por el aislamiento se ve coartada por el aumento en las exigencias de ventilación de las viviendas, de cara a las exigencias de salubridad y confort. La ventilación controlada, y con valores mínimos de renovación de aire, ha sido un gran paso adelante en la mejora de las condiciones de habitabilidad. Sin embargo presenta un aumento muy importante de la demanda de climatización. Esta nueva componente de ventilación implica que sólo con aislamiento nunca se alcanzará la demanda nula. Por tanto, la única forma de obtener edificios con demandas de energía muy reducidas o casi nulas pasa por la cobertura mediante energías renovables. Un claro ejemplo consiste en el aprovechamiento de la energía solar incidente sobre la envolvente del edificio. Esta envolvente no deja de ser una gran superficie captadora de radiación solar, desaprovechada en gran medida.

Hasta el momento, la envolvente térmica del edificio se plantea como un componente resistivo a las pérdidas de calor, con una respuesta pasiva. El cambio de enfoque radica en transformar este comportamiento pasivo en una respuesta activa, que permite absorber la mayor cantidad de energía incidente y transferirla a los espacios acondicionados de las viviendas. En esta línea, los sistemas constructivos configurados con fachadas ventiladas presentan un potencial importante. La cortina de aire de la fachada permite disponer de un fluido caloportador que haga esta función de transferencia de la energía incidente al interior de la vivienda, o que sirva de foco de calor primario para los sistemas de climatización. Y si se le suma el gran abanico de posibilidades constructivas y de operación, ponen a las fachadas ventiladas como una de las mejores opciones para la cobertura renovable de la demanda de climatización.

Pero debido precisamente a ese comportamiento activo, y a la diversidad de configuraciones posibles, se hace más necesario los ensayos de caracterización

térmica de dichos componentes. De forma que el disponer de herramientas fiables de modelado, basadas en ensayos representativos del comportamiento térmico de dichas fachadas, permita realizar un diseño de edificio fiable y que alcance las expectativas de cobertura de energía. Es en este punto donde se da una disponibilidad reducida de medios y una falta de experiencia global. Los ensayos en condiciones exteriores no controladas son complejos de estandarizar, de forma que los resultados de un centro de ensayo o laboratorio sean contrastables en otras instalaciones. Además, en sí mismo, el ensayo en condiciones dinámicas está sujeto a un elevado número de componentes de incertidumbre, difíciles de controlar y cuantificar. De forma que la calidad y utilidad de este tipo de ensayos está muy limitada a la fiabilidad con la que se llevan a cabo. Disponer de un equipo y una metodología de ensayo de una muestra representativa de la solución de fachada, y de un análisis y tratamiento de datos adecuado, es muy complejo. Todos estos aspectos son la base de la primera parte del presente trabajo de investigación.

La segunda parte del trabajo de investigación radica en la aplicación final a escala de edificio. El ensayo es el punto de partida, pero el componente ensayado no funciona, en la mayoría de los casos, de forma desligada, sino que se encuentra integrado en todo el conjunto del edificio. Es necesario dar un salto del componente al modelo de edificio. Este salto se puede realizar mediante herramientas de simulación que permitan integrar los resultados experimentales. Pero dicho salto, definido de forma sencilla, presenta una complejidad, y su resolución es importante de cara a que los resultados finales sean de aplicación real. Las dos ideas expuestas, ensayo y análisis a escala de edificio, son las dos componentes que se desarrollan en el presente documento. A continuación se realiza una introducción al concepto de fachada ventilada activa, y el estado actual en su caracterización y modelado.

I.2 Fachadas ventiladas

El diseño de una fachada debe cumplir unas propiedades físicas y estéticas para desempeñar las funciones como envolvente del edificio al que pertenece. En la actualidad, uno de los principales requerimientos es la eficiencia energética. La envolvente exterior del edificio juega un papel crucial en las demanda de consumos en calefacción y refrigeración del mismo para obtener unas condiciones ambientales de confort adecuadas en su ambiente interior. Además, esta función de la envolvente no se puede dissociar del resto de funciones como: el comportamiento acústico, respuesta a fuego, un buen comportamiento frente al movimiento de masas (aire y humedad), la disposición de las instalaciones de servicios, etc. Sin olvidar el papel estético que cumple la envolvente, ya que la fachada es la cara del edificio frente al entorno en el que se ubica, lo que le exige una adecuada integración y a su vez define su estatus dentro del mismo. La fachada ventilada presenta un gran atractivo para el diseño arquitectónico. Sus ventajas compositivas y constructivas han facilitado una amplia implantación de las mismas, en las últimas dos décadas, principalmente en los edificios de uso terciario y posteriormente en el residencial. Esta versatilidad hace que las fachadas ventiladas sean una opción óptima tanto para el diseño de nuevos proyectos, como para obras de rehabilitación, un ejemplo se muestra en la Figura I.1. Pero precisamente esta amplia versatilidad de diseño y composición complica el estudio o definición generalizada del comportamiento térmico de dichas fachadas y por tanto exige un estudio específico de cada solución constructiva y tipo de edificio. Es por ello que la *IEA (International Energy Agency)* ha intentado recoger los resultados de los principales estudios que se tienen hasta el momento sobre fachadas activas, dentro de

las cuales se engloban las fachadas ventiladas, junto con las posibilidades de análisis que se disponen actualmente^[242-263], ver Tabla I.1. En esta matriz se recoge el impacto o mejora frente a las soluciones constructivas tradicionales, o pasivas, y la posibilidad real de cuantificarlas con validez.



Figura I.1 – Ejemplos de soluciones de envoltente con fachada ventilada para obra nueva, imagen superior, y en rehabilitación, imágenes inferiores

Main Design Requirements	BIPV		Active envelopes		
	Impact	Tools	Impact	Tools	
use	suitability	2	2	2	1
	adaptability	2	2	2	2
occupant comfort	hygrothermal	2	2	3	3
	air quality	2	2	3	3
	visual	2	2	3	2
	acoustical	2	2	3	2
	hygiene	2	2	2	2
safety	water/air-tightness	2	2	2	2
	fire	3	2	3	3
identity	operational	3	2	3	1
	cost	3	3	2	2
environmental	energy	3	2	3	2
	raw & building materials	3	2	2	2
	air	3	2	2	2
	water	3	2	2	2
	land	3	2	2	2

key: impacts 1: about the same 2: slightly different 3: different
tools 1: satisfactory 2: partially satisfactory 3: unsatisfactory

Tabla I.1 – Matriz resumen de diseño y análisis de fachadas ventiladas

La evolución de los sistemas de fachada ventilada se ha producido sin ningún tipo de organización consensuada para definir con rigor los objetivos de esta tipología de

fachadas, así como asegurar una combinación de materiales y diseños adecuada y coherente. El desarrollo de los sistemas comerciales se ha llevado a cabo de una manera completamente parcializada, promovida por los fabricantes de los diferentes componentes de la fachada en busca de buenas soluciones, pero con una visión parcial de las exigencias de diseño comentadas anteriormente. Para entender mejor el concepto que engloba la terminología de fachada ventilada, a continuación se intenta realizar una clasificación.

I.2.1 Construcción, clasificación y tipologías

Es muy complicado definir una clasificación que recoja de forma precisa y completa al amplio conjunto de soluciones y conceptos que se engloban dentro del término fachada ventilada. En la actualidad la definición de fachada ventilada aparece en la norma EN 13119^[264-284], pero no existe una clasificación general única, ya que cada diseñador o fabricante presenta en sí mismo un amplio catálogo o clasificación propia. En el siguiente esquema de la Figura I.2 se intenta recoger todo el conjunto posible de fachadas ventiladas, en base a los principales conceptos que las definen, de forma que cualquier tipología pueda reflejarse. Este objetivo hace que se planteen combinaciones que en la realidad no se aplican o incluso no sean factibles técnicamente. Las soluciones de fachada estudiadas en la presente tesis aparecen sombreadas, y en especial en color naranja aparece el tipo de fachada que se analiza de forma completa, llegando hasta la escala de edificio.

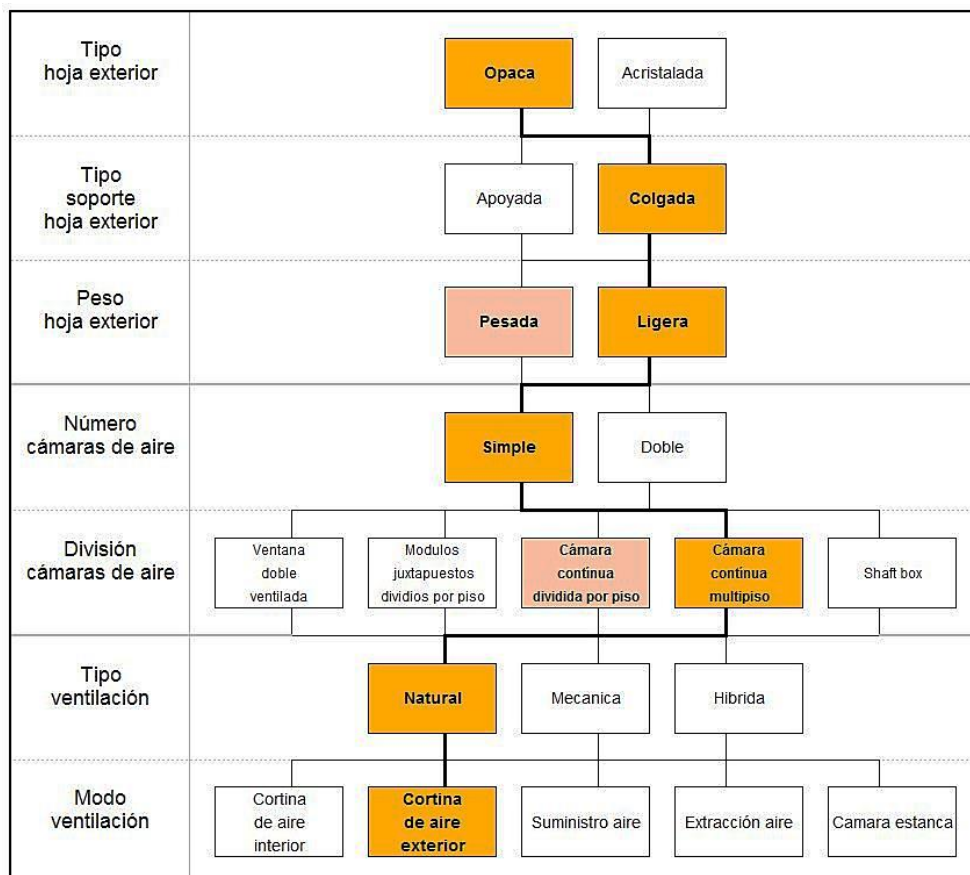


Figura I.2 – Esquema de clasificación para fachas ventiladas

Los principales parámetros de clasificación que se emplean son:

- Características de la hoja exterior, dentro de las cuales se realiza a su vez una distinción entre el comportamiento frente a la radiación solar, el sistema de soporte y el peso de la misma.
- Número y configuración de la cámara de aire.
- Movimiento del aire, principal origen de las mejoras en las propiedades físicas que presentan las fachadas ventiladas como envolvente del edificio, y que dependerá del tipo de ventilación y del modo en que se moverá el aire dentro del sistema formado por exterior-envolvente-interior.

El primer nivel de clasificación se basa en el tipo de hoja exterior. Esta clasificación se basa en la capacidad de aprovechamiento de la radiación solar que realiza la fachada a través de si la hoja exterior es opaca o acristalada. En el caso de la solución de hoja externa opaca, gran parte de la energía que incide por radiación se transmite al aire de la cámara por conducción y convección, y la posterior gestión de este aire implicará el aprovechamiento energético correspondiente. En la Figura 1.3 se recoge una configuración usual de fachada ventilada opaca, junto al flujo de energía asociado a la radiación que experimenta dicha fachada. Esta configuración está formada, de interior a exterior, por una hoja de fábrica, capa de aislamiento, cámara de aire ventilada, y hoja exterior de cierre. En el mercado hay un gran abanico de materiales para el cierre de la hoja exterior, lo que le da a las fachadas ventiladas esa gran posibilidad de diseño mediante texturas y formas. Estos materiales van desde la piedra a la madera, pasando por los materiales cerámicos y soluciones metálicas y plásticas.

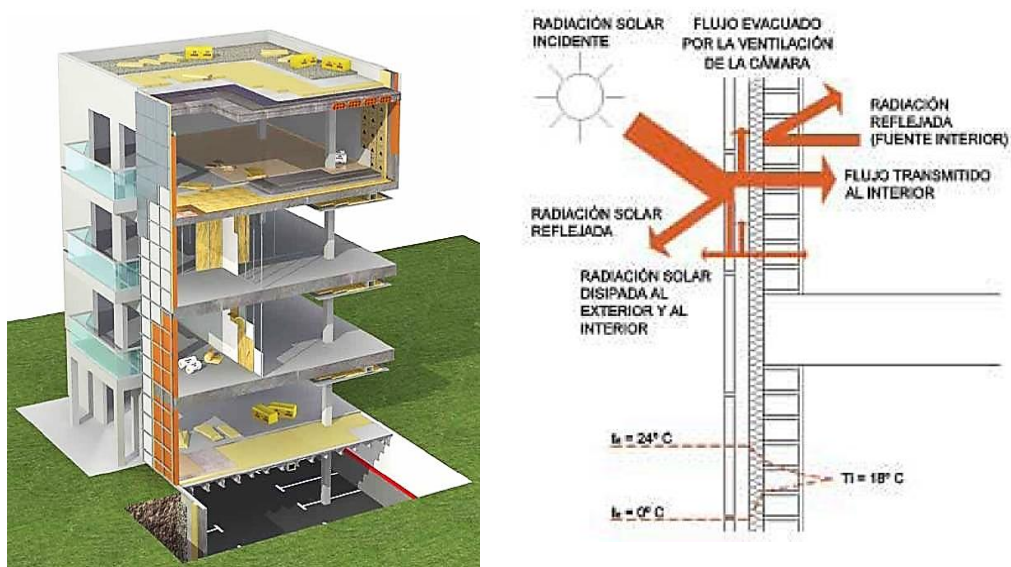


Figura 1.3 – Transmisión de la energía de radiación a través de una fachada ventilada opaca

La configuración de fachada acristalada, en concreto, permite un aprovechamiento mayor de la energía de radiación, ya que no solo se transmite al aire de la cámara sino que en gran medida el flujo de calor por radiación alcanza el espacio interior, ya que la hoja interior suele ser también acristalada, *Double-Skin Facade*, ver Figura 1.4. Esta configuración exige sistemas de control del aire, relativamente complejos, pero es la que permite obtener una mayor eficiencia energética de la envolvente. Las soluciones acristaladas suelen presentar la configuración de doble cámara de aire, como se expondrá más adelante, incorporando entre ambas hojas un sistema de

sombreamiento que permite reducir la ganancia solar cuando ésta es excesiva. Debido a su complejidad este tipo de soluciones suele aplicarse únicamente a edificios del sector terciario.

La configuración mixta de fachada con hoja exterior acristalada y hoja interior opaca corresponde a la solución constructiva conocida como muro *trombe*. En este caso se emplean una hoja interior de elevada capacidad térmica que permite acumular la energía radiativa para su posterior gestión. En la actualidad hay una serie de desarrollos técnicos que incluyen captadores fotovoltaicos en la hoja exterior acristalada, para obtener así un componente de generación eléctrica a través de la propia envolvente. Esta configuración tiene un doble aprovechamiento muy interesante. Por un lado se mejora el rendimiento eléctrico de las células fotovoltaicas, gracias a la refrigeración mediante la cortina de aire en movimiento, y por otro lado, el calor evacuado se puede aprovechar para la climatización.

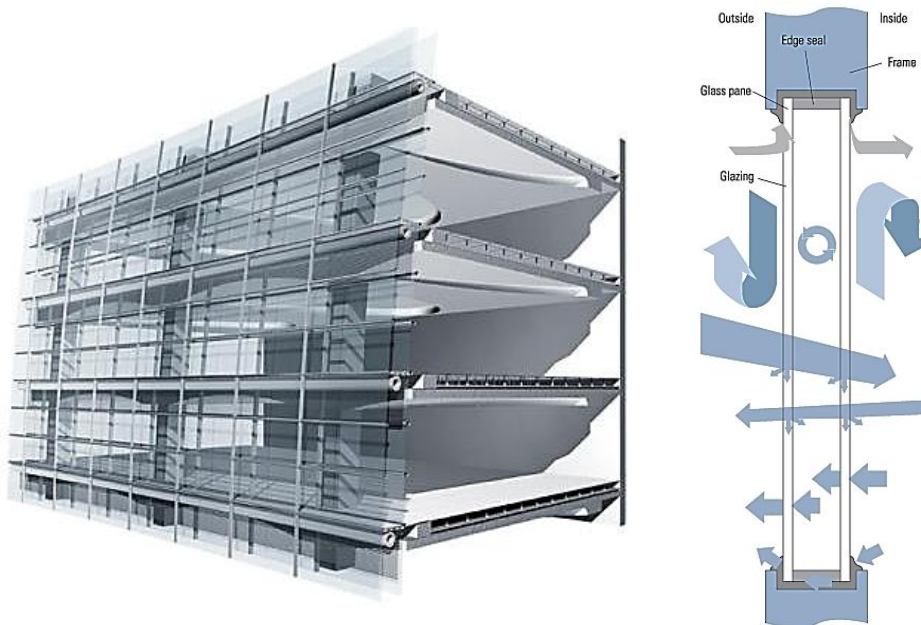


Figura I.4 – Transmisión de la energía de radiación a través de una fachada ventilada acristalada

El siguiente nivel de clasificación, que permite agrupar a un gran número de tipologías de fachadas ventiladas, es el sistema de sustentación de la hoja exterior, la cual puede ir apoyada en los forjados inferiores y pilares de la estructura del edificio, o colgada, de los mismos o de la hoja interior. Predominantemente, las fachadas apoyadas son de hoja exterior pesada y las fachadas colgadas presentan una hoja exterior ligera formada por una superficie continua o aplacada. En el caso de que la hoja exterior sea apoyada, el hecho de que todos los componentes de la fachada se soporten en los elementos inferiores mejora el comportamiento frente a las deformaciones mecánicas, térmicas y geológicas del conjunto. Ya que si se colgase el dintel de los huecos al forjado superior, para asegurar su capacidad mecánica portante frente a los esfuerzos a los que le somete la hoja superior, cualquier pequeña flecha de ese dintel podría generar fisuras en la hoja externa. Un ejemplo de la fachada ventilada apoyada es la fachada de ladrillo, ver Figura I.5, siendo su mayor pega la dificultad de apoyo en cada forjado, y teniendo una mayor limitación compositiva, ya que los huecos sólo pueden presentar anchuras limitadas y la composición es predominantemente vertical. Otra problemática que presentan las soluciones de hoja apoyada es la eliminación de los puentes térmicos correspondientes a frentes de forjados y pilares.

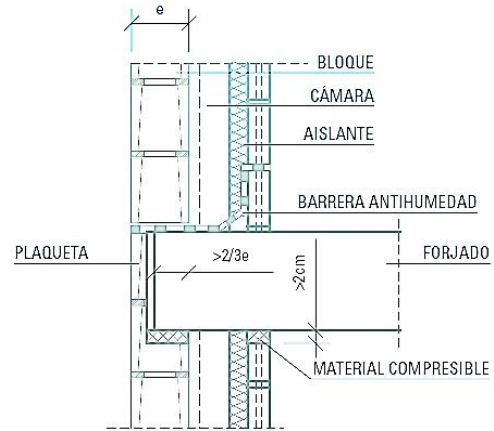


Figura I.5 – Ejemplo de fachada ventilada apoyada

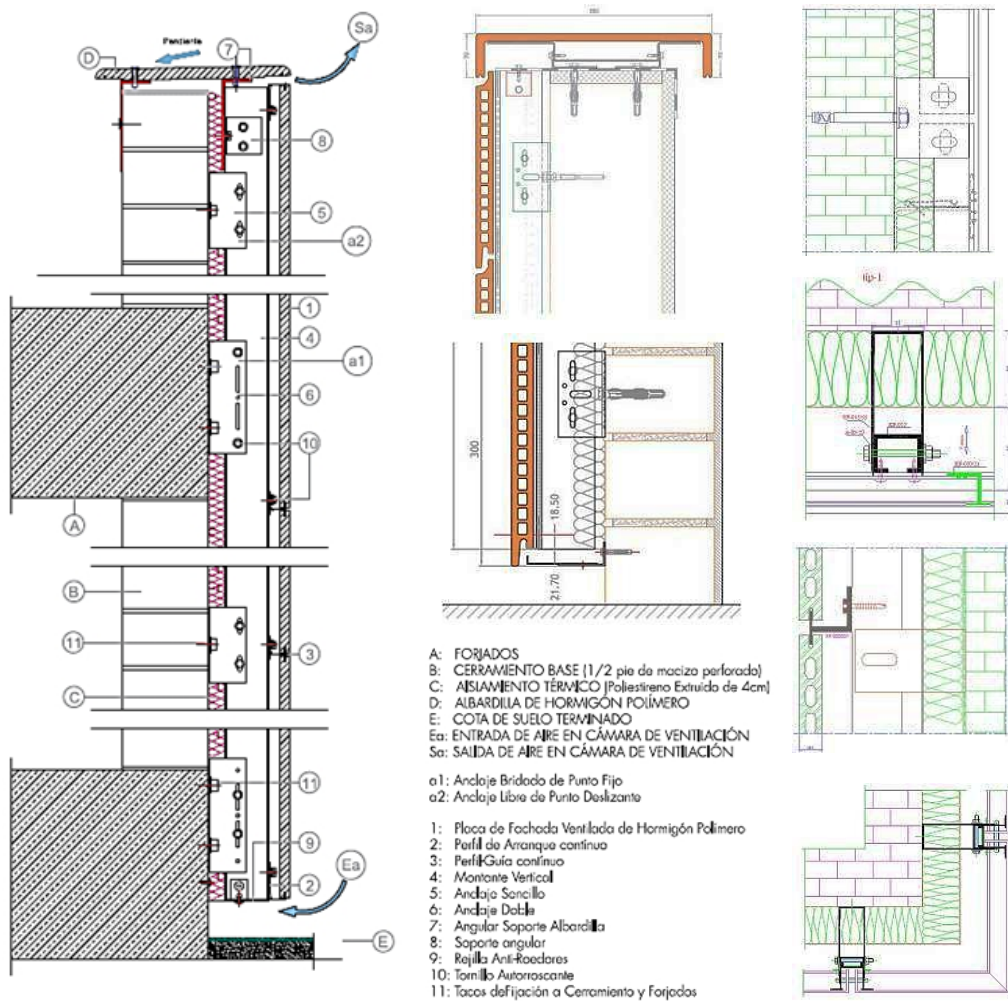


Figura I.6 – Ejemplo de esquema constructivo de fachada ventilada ligera de hoja exterior colgada con fijaciones a la hoja interior

La otra alternativa de montaje, la hoja exterior colgada, se origina gracias al gran desarrollo de la industria dedicada al diseño de premarcos de ventanas. Cuando el tamaño de los huecos es elevado es necesario que los premarcos se anclen al forjado para poder transmitir a éstos los esfuerzos de flexión y de su propio peso a los que están sometidos; se generan así elementos complejos formados por una estructura de tubos verticales, montantes, y horizontales, travesaños. La experiencia acumulada en su extendida utilización ha servido como base para el diseño de soportes de las hojas de muchos tipos de fachadas ventiladas. Por rapidez de montaje, economía de productos, amplio margen de diseño, y versatilidad de acabados, esta tipología de fachada ventilada es la más extendida en la edificación. En la configuración de hoja colgada hay dos alternativas de montaje. Una alternativa es que la hoja exterior cuelgue de la hoja interior, si ésta dispone de suficiente resistencia mecánica, mediante fijaciones puntuales, ver Figura I.6. Y la otra solución tipo es el empleo de un soporte formado por un entramado metálico vinculado a los forjados, lo que permite que los huecos puedan tener cualquier forma y dimensiones, aumentando en gran medida las posibilidades compositivas. Sin embargo, presenta mayores efectos de puentes térmicos en la capa de aislamiento debido a la estructura portante.

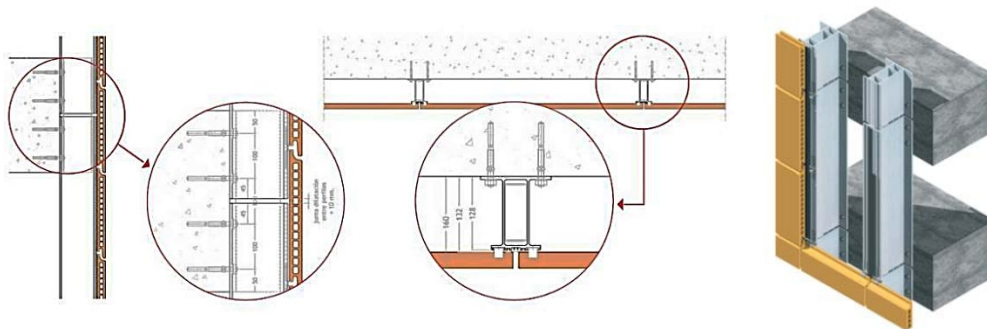


Figura I.7 – Ejemplo de esquema constructivo de fachada ventilada ligera de hoja exterior colgada mediante soportes entre forjados

En la tipología de fachada ventilada ligera existen dos tipos de hoja exterior de cierre, aplacada y continua. La configuración aplacada se conforma en base a unidades individuales de tamaño discreto, que permiten un montaje relativamente sencillo y facilita el aplomado y la solución de encuentros y geometrías complejas. Pero por otro lado presenta una de las principales desventajas de las fachadas ventiladas y es la durabilidad de la hoja exterior, especialmente en las zonas accesibles como plantas primeras y arranques. En general, el cambio de piezas debido a rotura es complicado y costoso. En cuanto al comportamiento térmico, al disponer de un gran número de rendijas, debidas a las juntas entre placas, el movimiento convectivo del aire en la cámara ventilada se ve muy condicionado por el efecto del viento. De forma que su aprovechamiento energético se ve muy condicionado y a su vez, complejo de evaluar. En cambio, la configuración de hoja continua, con una sola sección de entrada inferior y una sola sección de salida superior, presenta un comportamiento térmico más estable, y generado por el proceso de convección natural, en la mayoría de los casos. Esta segunda configuración es la que se toma como base del estudio experimental de la presente tesis. En ambas configuraciones de hoja exterior colgada, el abanico de materiales es muy amplio, desde materiales cerámicos, metálicos, pétreos, plásticos, etc..., lo que aporta una gran diversidad de comportamientos a la radiación solar.

El siguiente nivel de clasificación es por el peso de la hoja exterior. Como se ha comentado previamente, la configuración de la hoja exterior puede basarse en sistemas muy ligeros, como los que emplean placas metálicas, hasta las soluciones

más pesadas que presentan las hojas de albañilería apoyadas. Se toman como soluciones de hoja ligera a aquellas cuyo peso superficial no va más allá de los 75 kg/m². Aunque usualmente la hoja exterior ligera va asociada al sistema de montaje de hoja colgada, el desarrollo de sistemas de anclaje más resistentes permite aprovechar esta configuración para soportar soluciones más pesadas, como es el caso de uno de los ensayos del presente trabajo de tesis, en el que se emplea una hoja de hormigón armado. El origen de esta clasificación se debe a la repercusión en la respuesta de la fachada debido a la inercia térmica de dicha hoja. Como se verá a en los datos experimentales, el comportamiento varía en gran medida, y las prestaciones energéticas de la fachada están muy ligadas a este parámetro de inercia.

Este mismo criterio de clasificación por peso, se podría aplicar a la hoja interior, que puede presentar configuraciones muy ligeras, como por ejemplo los paneles sándwich o los sistemas de placas de cartón-yeso, siempre y cuando se mantengan las funciones físicas de dicha hoja, como la estanqueidad. La construcción ligera, en todas las capas del cerramiento, tiene cada vez mayor aceptación, por la sencillez y rapidez de construcción y su potencial de industrialización. Pero hay que tener en cuenta que la repercusión en el comportamiento energético es importante y exige un mayor estudio experimental. Por eso, una de las soluciones de fachada estudiadas presenta una configuración ligera en todas sus capas, para compararla con el resto de muestras ensayadas, que presentan una configuración tradicional pesada, en base a hoja interior de albañilería.

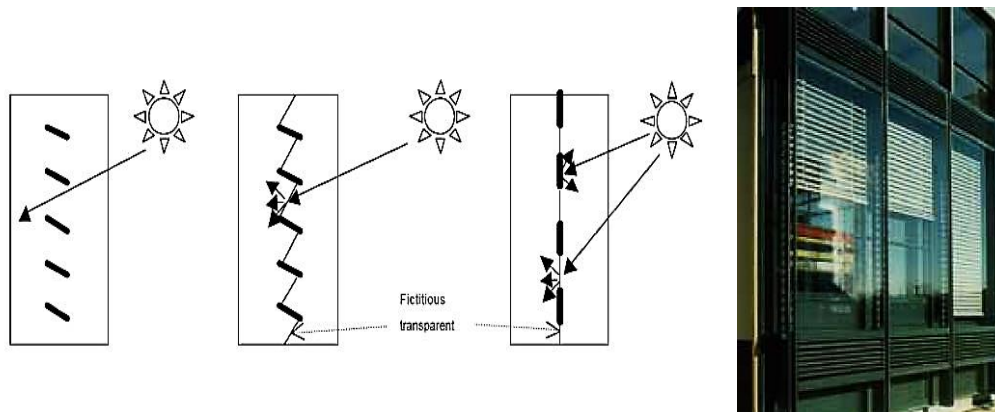


Figura I.8 – Cámara de aire con dispositivo de sombreado intermedio practicable

Los siguientes niveles de clasificación se centran en la propia configuración de la cámara ventilada, que es el componente diferencial respecto al resto de soluciones de fachada. Atendiendo al número de cámaras de aire, las fachadas ventiladas se pueden dividir en dos grandes familias: las que están formadas por una sola cámara de aire, y aquellas que presentan un dispositivo de lamas centradas en la cámara de aire, que permiten dividirla a su vez en dos subcámaras según las condiciones climáticas, ver Figura I.8. Esta configuración de doble cámara de aire se emplea únicamente en fachas dobles acristaladas, en la que la cortina intermedia de lamas actúa como dispositivo de sombreado que reduce las ganancias solares de la fachada, cuando éstas son elevadas. Las fachadas acristaladas tienen mayor aplicación en edificios de carácter terciario principalmente. Otro nivel de clasificación tiene en cuenta la forma física en la que se encuentra dividida la fachada ventilada en altura. La división puede producirse por piso, o de forma continua a lo largo de toda la envolvente. La Figura I.9 recoge esquemáticamente las posibilidades planteadas.

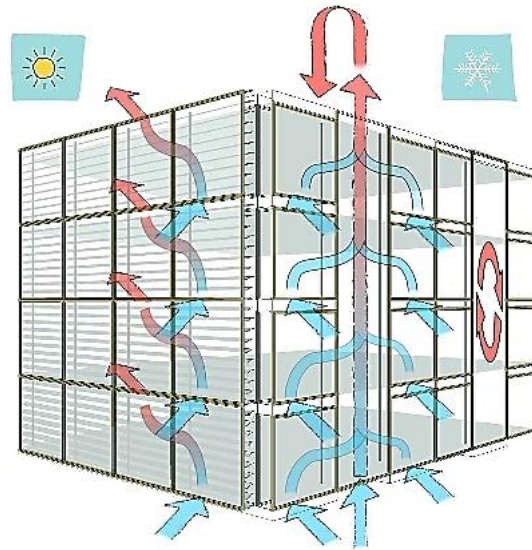


Figura I.9 – Esquema de posibilidades de división en altura de la cámara ventilada

Las fachadas divididas por piso, que a su vez pueden estar formadas por módulos individuales yuxtapuestos o por una única cavidad de aire, permiten un control más preciso de los parámetros de funcionamiento, como la temperatura de aire, velocidad de aire, etc. Este sistema es usual cuando el aire de la cámara ventilada va asociado a un sistema de climatización individual por planta. Para aumentar el efecto chimenea la cámara de aire se puede prolongar a lo largo de varios pisos y conectarla a las cavidades de cada piso, lo que permite una conexión a un sistema de climatización centralizado, ver Figura I.10. Por último, estaría la configuración de cámara de aire multipiso, y que a su vez no presenta ningún tipo de división horizontal y por tanto recorre toda la envolvente. Esta es la configuración más usual en edificios residenciales. En esta variante cabría una última alternativa, formada por aquellas fachadas en las que la hoja exterior está formada por lamas posicionables, de forma que amplíen aún más las posibilidades de respuesta de la fachada a las condiciones climáticas, ver Figura I.11.

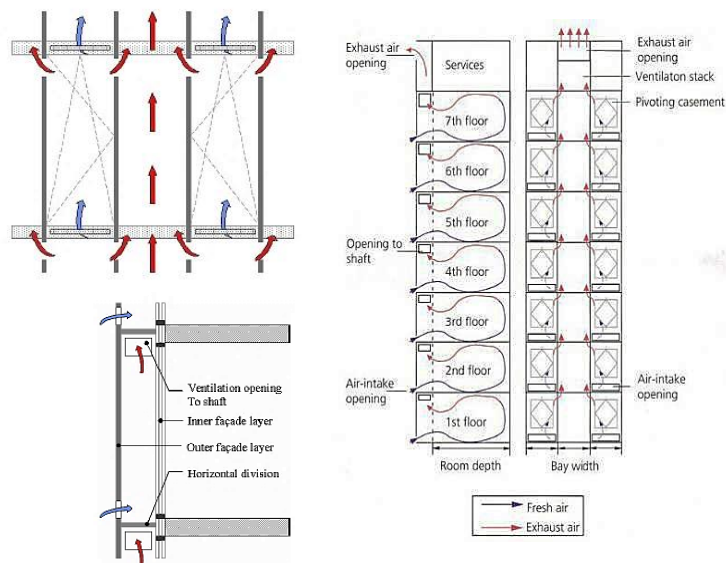


Figura I.10 – Cámara de aire multipiso con efecto chimenea

El siguiente nivel de clasificación está basado en el tipo de ventilación, que a su vez, está relacionado con las fuerzas motoras del movimiento de aire en la cámara ventilada y éstas pueden ser:

- Ventilación natural: el efecto de flotación producido por la diferencia de presión entre volúmenes con diferente densidad debido a las variaciones de temperatura a lo largo de la fachada generan un movimiento de masas. Otro motor del movimiento de aire dentro de la cámara es una velocidad de viento elevada en la superficie exterior de la hoja, lo que genera a su vez una subpresión que acelera el aire dentro de la cámara.
- Ventilación forzada: el movimiento de aire es generado y controlado mediante un sistema de impulsión mecánico, en general, conectado al sistema de climatización.
- Ventilación híbrida: en este tipo de ventilación se intenta aprovechar al máximo la ventilación natural, y en aquellos casos en los que las fuerzas de flotación por convección natural no sean suficientes entraría la convección forzada.

Finalmente, queda la clasificación por el modo de aprovechamiento de la cortina de aire, relacionado con el modo de ventilación de la cámara. El modo de ventilación hace referencia al origen y destino del aire circulante por la cámara ventilada. No todas las fachadas pueden presentar cualquiera de los modos de ventilación, y en general, una fachada está caracterizada por un solo modo de ventilación, aunque existan excepciones en las que el sistema de control y una serie de accesos motorizados dispuestos en ambas hojas permitan pasar de un modo a otro.

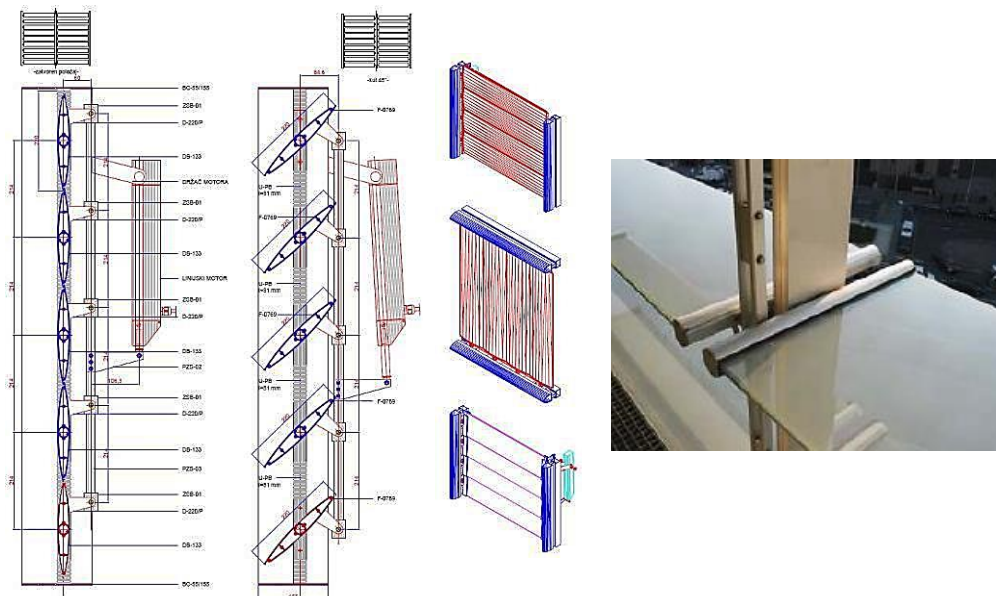


Figura I.11 – Fachada ventilada con hoja exterior formada por lamas

Existen cinco modos de ventilación básicos que a su vez se pueden invertir o combinar para ampliar las modalidades de ventilación, ver Figura I.12. Estos modos serían:

1. Cortina de aire exterior: el aire es tomado del ambiente exterior y devuelto de nuevo al mismo, formando así una cortina de aire que envuelve la hoja exterior de la fachada.

2. Cortina de aire interior: en este caso el aire que entra en la cámara proviene del espacio interior y tras recorrerla vuelve al mismo, formando, igualmente, una cortina de aire que envuelve, esta vez, la hoja interior de la fachada.
3. Suministro de aire: el aire entra del ambiente exterior y, tras recorrer la cámara ventilada, se introduce en el interior de forma directa o tras pasar por el sistema de climatización.
4. Extracción de aire: el aire entra en la cámara desde al interior y es evacuado, tras recorrer ésta, al exterior.
5. Cámara de aire estanca: en este caso no hay comunicación entre exterior e interior, y la cámara actúa como barrera amortiguadora de las condiciones térmicas.

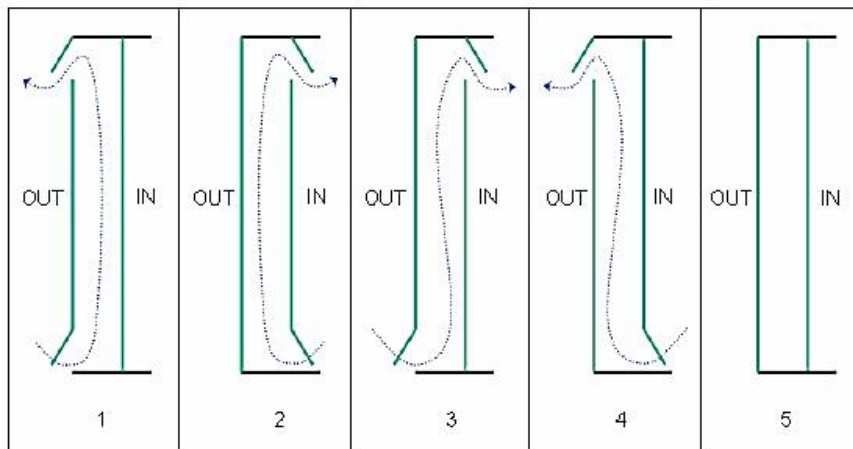


Figura I.12 – Modos básicos de ventilación

Una vez repasadas todas las posibles configuraciones de fachadas ventiladas queda más patente la gran diversidad de tipologías y el abanico de comportamientos térmicos de las mismas. Y por tanto, queda más patente la necesidad de disponer de herramientas de ensayo para obtener una adecuada caracterización, de cara a su valoración energética. Pero la elección de la metodología de ensayo es clave en la obtención de resultados fiables y representativos. Sumado a esto, hay que tener en cuenta el hándicap de la necesidad de realizar los ensayos en condiciones exteriores. Para entender mejor estos aspectos, en el siguiente apartado se realiza una breve descripción de la situación actual de los laboratorios y equipos de ensayo disponibles a nivel internacional.

I.2.2 Estado del arte en la modelización térmica de fachadas ventiladas

La caracterización del movimiento de convección mediante ensayos experimentales de referencia comienza a mediados del siglo pasado. El primer trabajo que sienta las bases de los modelos de convección en placas planas verticales es el de *Elenbaas*^[285,288], que posteriormente ha sido refinado con ensayos más precisos gracias al desarrollo de instrumentación de medida más fiable y con menor error de medida. Un ejemplo de estos trabajos son los correspondientes a *Bodoia* y *Osterle*^[289,310], *Aung*^[311], *Curchill*^[312,335], *Bar-Cohen* y *Rohsenow*^[336,357], *Sparrow* y *Azabedo*^[358,360,361,383],

Ramanathan y Kumar^[384], Brinkworth^[385,404], y más recientemente los estudios de Olsson^[382]. Este es un pequeño resumen de los trabajos de investigación más relevantes, aunque la bibliografía es muy extensa, como se puede ver en el apartado de referencias, donde se recogen con más detalle los trabajos disponibles sobre este tema. Pero en la mayoría de los casos, los datos experimentales se obtienen de ensayos en régimen estacionario, en condiciones controladas de laboratorio, con probetas formadas por placas de dimensiones reducidas en comparación con los tamaños de las fachadas a escala de edificio. Esto permite obtener modelos de una forma relativamente sencilla, asumiendo simplificaciones en los aspectos más complejos, como son las pérdidas de carga, por ejemplo. Aun así, dichos modelos tienen una gran aplicación y sirven de referencia como base fundamental para estudios más específicos. Pero su aplicación directa a modelos de fachadas a escala real se ve limitada.

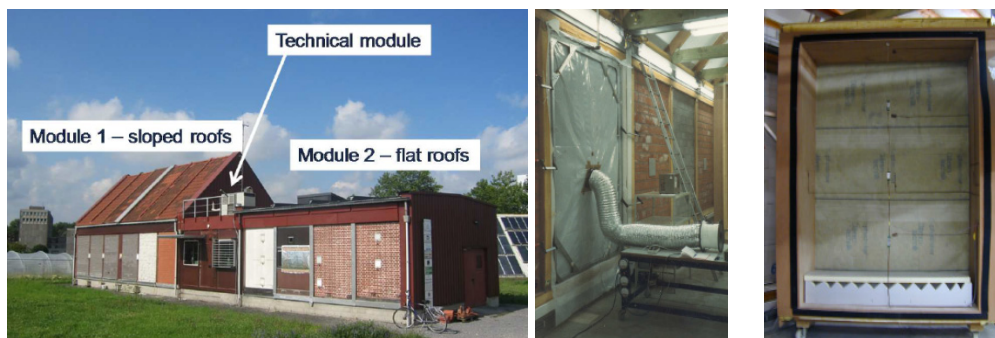


Figura I.13 – Edificio de ensayos VLIET en K. U. Leuven en Bélgica

Hacia la última década del pasado siglo, el rápido desarrollo de la informática cambió el enfoque en el análisis y modelado. Las herramientas de elementos finitos^[14] permitieron superar las limitaciones de los estudios experimentales. Incluso, el potencial de dichas herramientas también ha evolucionado rápidamente, permitiendo aumentar la definición de los puntos críticos del proceso de convección, como son las capas límites y zonas de turbulencia^[141]. En paralelo, el desarrollo científico de modelos matemáticos aplicados a estas herramientas ha permitido que se pueda analizar cualquier tipo de situación bajo estudio. En este ámbito, la bibliografía es muy extensa. Pero, por el contrario, estos modelos exigen de un grado de definición previa muy elevado, lo que hace necesario un contraste experimental para su correcta validación. Esta situación ha implicado un renovado auge del ensayo experimental en el inicio del siglo XXI, que se mantiene en la actualidad.



Figura I.14 – FEWF, Field Exposure Wall Facility, del NRC-IRC de Canada

Sin embargo, el ensayo en condiciones reales es complejo. Ya solo en el diseño del equipo experimental, como punto de partida, se presenta una gran complicación. Si se realiza un repaso de los principales centros que disponen de equipos para ensayo en condiciones exteriores, a nivel europeo^[87], se puede ver la gran diversidad de los mismos, tanto en configuraciones como en características de ensayo. Se encuentran instalaciones de ensayo como el *VLIET*, Figura I.13, de la universidad de *Leuven*, en *Belgica*, en el que se analizan soluciones de fachada y cubierta, tanto inclinadas como planas. Esta instalación es muy potente y versátil, en la que se pueden analizar simultáneamente diferentes muestras y tipologías de ensayo.



Figura I.15 – Equipos de ensayo en el centro de ensayos del *Fraunhofer* en *Holzkirchen*, Alemania

Otra configuración muy diferente es el edificio *FEWF*, Figura I.14, del *NRC-IRC* de *Canada*, situado en *Otawa*. Esta instalación se basa en un edificio en el que se pueden sustituir sus componentes acristalados, así como ciertos paños de la envolvente opaca. Un centro de ensayos de referencia es el *Fraunhofer*, con unas instalaciones en *Holzkirchen*, Alemania, donde disponen de 27 módulos o unidades de ensayos. En este caso, cada unidad se adapta a las configuraciones de las muestras bajo estudio. En la Figura I.15 se muestra un pequeño ejemplo de dichos módulos, para estudios de humedad y movimiento de masas, imagen de la izquierda, ensayo de cubiertas, imagen central, y una instalación a escala de edificio para el estudio de la integración de diferentes componentes y sistemas de climatización, imagen de la derecha.

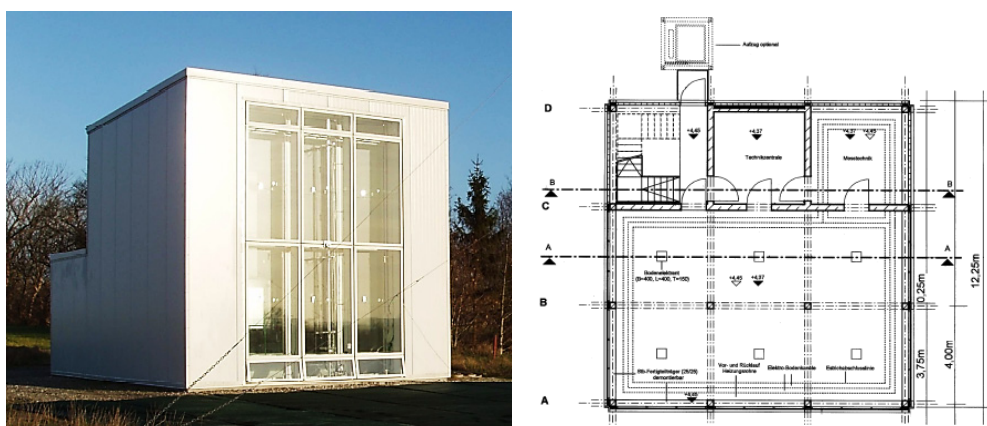


Figura I.16 – Instalación *Cube* de la Universidad de *Aalborg*, en Dinamarca

Otro ejemplo de instalación definida para un ensayo tipo, es el *Cube*, Figura I.16, situado en *Aalborg*, Dinamarca. Esta instalación está diseñada y configurada específicamente para el estudio de fachadas ventiladas dobles acristaladas. Un concepto de equipo de

ensayo en exteriores, diferente a los mostrados hasta ahora en los ejemplos anteriores, son las celdas *PASLINK*. En este caso, el enfoque es disponer de una misma tipología de equipo de ensayo en diferentes centros de investigación. Esto facilita en gran medida la estandarización de los resultados de ensayo, si además del equipo, los centros emplean la misma instrumentación de medida, aplican el mismo procedimiento de ensayo, y usan las mismas herramientas de tratamiento de datos y modelado.



Figura I.17 – Celdas PASLINK en la Universidad de Innsbruck, Austria

El grupo de centros que disponen de estos equipos forma una red de excelencia, de forma que el ensayo *PASLINK*, no se reduce a una tipología de equipo, sino a una metodología de trabajo. En la Figura I.17 se muestran las dos celdas de ensayo situadas en Innsbruck. Frente a la gran diversidad de equipos y metodologías de ensayo, en el año 2011 se configuró el *Annex 58* de la *IEA*, con el principal objetivo de estandarizar los métodos de ensayos en condiciones reales a escala de edificio. En este grupo de trabajo participa como asesor la red *DYNASTE*, configuración actual de la red *PASLINK*, gracias a los más de 20 años de experiencia con las celdas y con la configuración de una red de excelencia de centros de ensayo. Los trabajos que hasta el momento se han desarrollado en el grupo del *Annex* demuestran la complejidad de homogeneizar las condiciones de ensayo partiendo de un conjunto de equipos y metodologías de trabajo tan dispar. Si se analiza con detenimiento el ensayo en condiciones exteriores a escala real, existe una limitación física, que se puede definir como una especie de principio de incertidumbre similar al planteado por Heisenberg en la mecánica cuántica. Esta limitación se origina en la elección del tamaño de la muestra, y por tanto del equipo de ensayo, de cara a la aplicabilidad de los resultados en el edificio real. Es decir:

- Tamaños de muestra grandes permiten obtener resultados experimentales directamente aplicables al edificio real, pero aumentan en gran medida la incertidumbre del ensayo.
- Tamaños de muestra pequeños reducen en gran medida la incertidumbre del ensayo pero limitan la aplicabilidad de los resultados al edificio real.

Además de poderse aplicar al tamaño de la muestra, el principio de incertidumbre también se puede aplicar al propio equipo de ensayo y la versatilidad del campo de aplicación. Es decir:

- Cuantas más variables y parámetros permita ensayar el equipo y el procedimiento, menor precisión se obtendrán en la caracterización individual de las mismas. Por ejemplo, si el equipo permite caracterizar prestaciones térmicas, acústicas, higroscópicas, mecánicas, etc... el control de las incertidumbres asociadas a cada caracterización se dispara.
- Si el equipo y el procedimiento de ensayo se diseña y define específicamente para caracterizar una sola prestación, como puede ser el comportamiento térmico únicamente, las incertidumbres asociadas pueden controlarse de una forma más precisa.

Estas limitaciones físicas del ensayo fueron el punto de partida para el diseño de la metodología *PASLINK*. En este sentido, el diseño de la celda permite trabajar con un tamaño de muestra que permite obtener modelos aplicables a la escala real de edificio mediante herramientas de simulación, y que mantiene las incertidumbres de ensayo al nivel de los ensayos normalizados en condiciones de laboratorio. Y por otro lado, todos los esfuerzos de diseño se centran en la obtención de un equipo óptimo para la caracterización térmica de los componentes, exclusivamente. De forma que todos los aspectos que afectan a dicha caracterización, puentes térmicos, infiltraciones de aire, etc... en el equipo y en la metodología de ensayo, se controlen y minoren de la mejor forma posible. Por estas características expuestas anteriormente, se elige el método *PASLINK* como referencia para el desarrollo de la presente tesis, de forma que los trabajos de investigación consisten en la puesta a punto de una celda de ensayos, su calibración y análisis de incertidumbres de ensayo, como primera parte. Y en el ensayo y modelado de fachadas ventiladas para su aplicación en la reducción de la demanda de energía en climatización de viviendas, resolviendo el salto entre la escala de probeta y la escala de edificio, mediante herramientas de simulación, como segunda parte del trabajo.

1.3 Objetivos y alcance

El aporte científico del trabajo de tesis consiste en el análisis de la potencialidad en la reducción de la demanda de energía en vivienda mediante el aprovechamiento solar a través del uso de fachadas activas. Pero para poder desarrollar este trabajo son necesarios dos pasos previos. El primero consiste en disponer de la herramienta de ensayo adecuada para poder estudiar de forma experimental el comportamiento de dichas fachadas activas en condiciones reales. Y el segundo paso consiste en resolver el vacío en el salto entre los datos experimentales y el estudio a escala de edificio. Entrando más a detalle, a continuación se definen los objetivos concretos del trabajo de investigación así como el alcance de los mismos:

Objetivo 1:

Puesta a punto de una celda de ensayos *PASLINK*.

Alcance: partiendo de una celda *PASSYS* original, se quiere transformar en una celda tipo *PASLINK*, implantando todas las mejoras a partir de la experiencia adquirida por la red de centros que disponen de dichos equipos. Las mejoras a desarrollar consisten en el aumento de la precisión del equipo, reduciendo los puentes térmicos de la sala de ensayos, mejorando el sistema de sellado del portamuestras para reducir las infiltraciones, y ampliando la resolución en la medida del flujo de la envolvente en zonas borde. Para este objetivo se cuenta con la asesoría de J.J Bloem, uno de los principales responsables del proyecto *PASLINK*.

Objetivo 2:

Calibración y análisis de incertidumbres de la celda.

Alcance: tras la puesta a punto, se pretende obtener una estimación fiable de la incertidumbre del ensayo, partiendo de realizar el procedimiento de calibración establecido en los protocolos de ensayo de la red *PASLINK*. Este proceso de calibración es la mejor herramienta para conocer el comportamiento del equipo instalado.

Objetivo 3:

Estandarización y aseguramiento de la trazabilidad de la celda y de la metodología de ensayo.

Alcance: para verificar la correcta puesta a punto y calibración de la celda se realiza el ensayo de interlaboratorio *IQ-Test*. Este ensayo consiste en la medida de dos componentes, uno consistente en un muro opaco construido *in-situ*, pero con las características de los materiales acotadas. Y un segundo componente que es una ventana única, que circula por el conjunto de laboratorios. Este estudio permite analizar el estándar de calidad de la celda de ensayos y a su vez asegurar la trazabilidad de la instalación y metodología de trabajo, de cara a validar la fase experimental del trabajo.

Objetivo 4:

Análisis experimental de fachadas ventiladas.

Alcance: se van a estudiar tres muestras de fachadas ventiladas con diferentes configuraciones, de esta forma se cubre un amplio espectro de las tipologías de fachadas bajo estudio. Estas muestras consisten en una fachada de hoja ligera y otra de hoja pesada. En ambos casos con movimiento de convección natural en la cámara de aire. Y una tercera muestra de fachada industrializada ligera con movimiento forzado. En cada muestra se realizan dos periodos de ensayo, uno para el desarrollo de los modelos y otro periodo para la validación. Un objetivo paralelo que se quiere alcanzar, es que los datos experimentales sirvan como referencia libre para que cualquier investigador pueda emplearlos para validar sus modelos.

Objetivo 5:

Desarrollo de un modelo matemático del comportamiento térmico de la cámara ventilada.

Alcance: primero se verifica la validez de aplicación de los modelos existentes en la bibliografía para predecir los datos experimentales. En función de los resultados se seleccionará el más adecuado o, de ser necesario, se desarrollará un nuevo modelo específico. Para ello se toma como ejemplo de trabajo la muestra de fachada ventilada natural con hoja ligera, por tratarse de la solución constructiva más extendida en el sector de la edificación residencial. El modelo se adaptará para poder ser empleado en las herramientas de simulación energética de edificios.

Objetivo 6:

Estudio a escala de edificio del aprovechamiento energético de los sistemas de fachada ventilada.

Alcance: siguiendo con la línea de la fachada ventilada ligera, el modelo desarrollado se empleará en el estudio de demandas energéticas a escala de edificio. Como herramienta de trabajo se emplea el software *TRNSYS*. El estudio se realiza sobre un edificio base, que sirve como referencia para cuantificar la demanda en edificios sin rehabilitar, y edificios modernos que cumplen los requisitos normativos vigentes. Sobre esta base de referencia se

determina la reducción de demanda mediante el aprovechamiento de la potencialidad de captación de radiación solar de la fachada ventilada en la reducción de demanda por ventilación y su efecto en la demanda por envolvente. Como hito final de este objetivo, además, es resolver el paso de los datos experimentales a escala de celda de ensayos al análisis a escala de edificio.

La configuración de la memoria que se muestra a continuación recoge en cada capítulo los trabajos desarrollados para cada objetivo definido anteriormente. Cerrándose el documento con un apartado final de conclusiones y valoración final de los resultados obtenidos, así como futuras líneas de investigación.

Capítulo 1

Equipamiento experimental





1.1 Celda de ensayos PASLINK

Las características de los equipos y las metodologías de ensayo y tratamiento de datos son condicionantes en todo trabajo experimental. Es por ello, que en el presente apartado, se recogen las principales razones de la selección de la celda tipo *PASLINK* como equipo de referencia para la parte experimental de esta tesis. La selección de este equipamiento se realizó tras llevar a cabo una amplia revisión, a nivel internacional, de los medios de ensayo en condiciones ambientales exteriores. El principal objetivo de la elección de una celda de esta tipología es la búsqueda de condiciones de ensayo normalizadas y trazables. En este capítulo se muestra una breve introducción del desarrollo de estos equipos. Asociada a los mismos existe una red de centros de investigación activa, *DYNASTEE*, (*DYNamic Analysis, Simulation and Testing applied to the Energy and Environmental performance of buildings*). También se describen las características principales de la celda *PASLINK-EGUZKI*, la cual se encuentra ubicada en las instalaciones del *LCCE* (*Laboratorio de Control de la Calidad en la Edificación*), que el Gobierno Vasco dispone en la ciudad de Vitoria-Gasteiz.

1.1.1 Origen y desarrollo de las celdas PASLINK

La metodología de ensayos *PASLINK* es el resultado de más de dos décadas de trabajos de investigación y desarrollo, realizados en sucesivos proyectos subvencionados con fondos de la *CE*, *Comunidad Europea*. Esta metodología engloba todos los aspectos de un ensayo experimental, desde el equipamiento, pasando por los procedimientos de ensayo, y finalizando con el tratamiento de datos y modelado matemático. La idea original fue propuesta por N. Baker^[54], tras un estudio realizado para la *CE* en 1983. En él proponía la necesidad de desarrollar una celda de ensayos altamente normalizada para la caracterización experimental en condiciones reales de los componentes constructivos de la edificación. El equipamiento de ensayo debería disponer de una tecnología que permitiera caracterizar térmicamente a escala real e investigar sobre el aprovechamiento solar para la reducción de consumos energéticos.

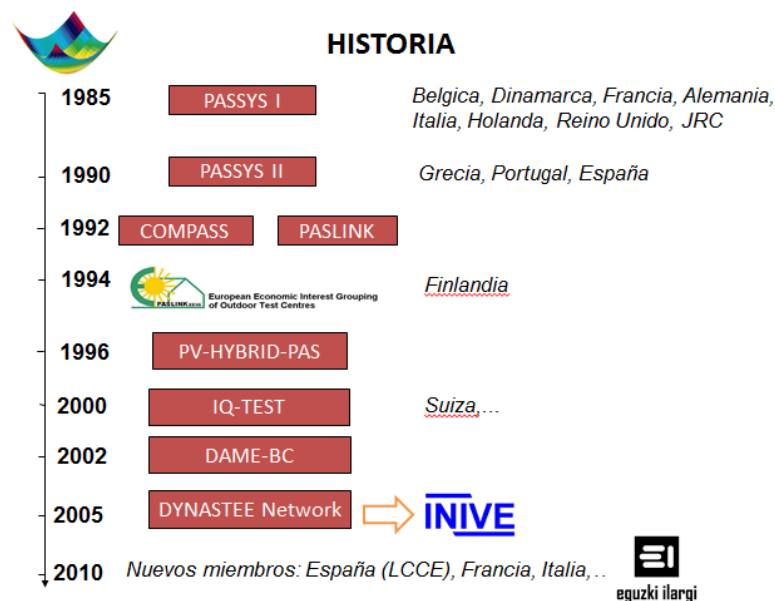


Figura 1.1 – Historia del desarrollo de la metodología *PASLINK*

Estos equipos de ensayo deberían presentar unas dimensiones que permitieran reproducir los procesos de transmisión de calor que se producen en los edificios, y de igual forma, una medición muy precisa, tanto de las condiciones exteriores, como interiores de la celda. Además de la necesidad de disponer de equipos con las mismas características, debería alcanzarse la trazabilidad en los resultados de ensayo. Para lograr dicho objetivo, teniendo en cuenta la amplia variabilidad de climatologías, sería necesario disponer de una red de centros de ensayos internacional. Esto sólo se podría conseguir mediante un preciso control de las condiciones interiores del equipo de ensayo, para así poder reproducir las ganancias de calor, y aplicar métodos de simulación de las condiciones exteriores entre centros. Este planteamiento fue el origen del ensayo tipo *PASLINK*. Los principales aspectos del mismo se han definido entre los años 1985 y 2004, continuándose en la actualidad su desarrollo científico y tecnológico. En la Figura 1.1 se recogen los principales hitos que marcan el estado del arte actual, que se resumen a continuación.

PASYSS I (1985):

Tomando los conceptos planteados por Baker, el *DFVLR*, (*German Research Institute for Aviation and Space Flight*), de Stuttgart presentó a la CE el primer diseño detallado de celda de ensayos^[126], que fue el modelo que tomó como base el primer proyecto *PASSYS* (*PASSive Solar Components and Systems Testing*), que arrancó en octubre de 1985 y finalizó en 1988. Tras este proyecto quedaron definidas las características iniciales de esta tipología de ensayos, desarrolladas por los cuatro subgrupos de trabajo que abarcaban los principales aspectos de un ensayo en condiciones reales. Los subgrupos se encargaron de la definición de los equipos de medida (*TSM*, *Test Site Management*), de la metodología de ensayo (*TME*, *Test METHodologies*), del desarrollo y validación de modelos (*MVD*, *Model Validation and Development*), y de las herramientas de trabajo generales (*SDT*, *Simplified Desing Tools*). Estos trabajos se realizaron con la supervisión y participación activa del *CEN* (*Committee for European Standarization*). En 1986 se instalaron los dos primeros prototipos de celda de ensayos en el *JRC* (*Joint Research Centre*) en Ispra. Tras la puesta a punto de los mismos, se construyó la primera remesa de celdas de forma industrial, por parte de la empresa alemana Cadoltto, y se distribuyeron por el conjunto de centros de investigación participantes en el proyecto.

PASYSS II (1990):

En 1990 arrancó la segunda etapa del proyecto de desarrollo de las celdas, denominado *PASSYS II*, en el que entraron a participar un nuevo conjunto de centros de investigación, ubicados en países con climatología mediterránea. Esta situación permitía ampliar el espectro de condiciones meteorológicas de ensayo, ya que en la primera fase del proyecto el conjunto de participantes pertenecían a países del centro y norte de Europa de severidad climática fría. A su vez, durante esta fase se amplió la capacidad de ensayo de las celdas a los componentes de cubierta, y a la posibilidad de modificar la orientación de la celda. Paralelamente, se continuó desarrollando cada uno de los aspectos del ensayo, mediante el trabajo de los cuatros subgrupos que abarcaban el conjunto de la metodología y se redactaron los documentos básicos de guía^[129,355].

COMPASS (1992):

En el año 1992 se amplían los trabajos de desarrollo de la metodología de ensayo mediante el proyecto *COMPASS* (*Appropriate testing and evaluation of passive solar components for improvement of thermal comfort in buildings*). Uno de los principales puntos que englobaba este proyecto consistía en mejorar la precisión de la medida del flujo de calor que intercambia la envolvente interior de la celda

de ensayos, para lo cual se plantearon dos alternativas. La primera, denominada como *PAS (Pseudo Adiabatic Shell)*^[57,354] consistía en el control de la temperatura de las superficies interiores mediante láminas calefactores y la colocación de una segunda capa aislante en las paredes de la sala de ensayo. La posterior caracterización del flujo de calor se realizaba mediante la medida de la temperatura a ambos lados de las superficies, estando sus propiedades térmicas bien caracterizadas. La segunda alternativa se basaba en la medida directa mediante sensores de flujo que revestían la superficie interior de la celda y que se denominaron *HFS Tiles (Heat Flux Sensors Tiles)*^[320]. Estos avances permitieron acortar el periodo de ensayo y disminuir la incertidumbre de los resultados.

RED PASLINK (1992):

Tras seis años de trabajo se había formado una red de instituciones científicas única por sus características, de calidad de ensayos altamente estandarizados. Esta red pasó a denominarse red *PASLINK*, y los centros que la conformaban podían caracterizar un elemento constructivo empleando la misma celda, y aplicando las mismas rutinas de ensayo, tratamiento de datos, y modelado de la muestra, y por tanto, obteniendo resultados uniformes, a lo largo de toda Europa. La celda de ensayos, tras las pruebas realizadas y evolución de los diferentes prototipos, había sido definida y planteada con un elevado grado de análisis y desarrollo. Se habían evaluado las diferentes fuentes de incertidumbre y error que podían generar dichas celdas, como los puentes térmicos e infiltraciones de aire, tomando medidas para reducirlas al máximo. Las problemáticas de la cuantificación de parámetros como el flujo de calor de la envolvente, se habían resuelto desarrollando nuevos sistemas de medida y sensores, y las correspondientes técnicas de instalación.

También se habían evaluado las diferentes estrategias de ensayo y modelado, optándose por la opción de trabajar en base a técnicas de identificación de parámetros. El procedimiento final^[95] permitía trabajar con modelos de parámetros concentrados aplicados tanto a la celda de ensayos, como a la caracterización de la muestra bajo estudio. Esta metodología se adaptaba de forma idónea a las condiciones dinámicas del ensayo, permitiendo un amplio abanico de condiciones climáticas de estudio, así como trabajar con un gran rango de propiedades térmicas de la probeta, en relación a la inercia térmica, la resistencia térmica y la ganancia solar de los componentes. Una vez definidos los modelos de trabajo, se desarrolló una metodología óptima común de ensayo y validación de los mismos, mediante una rutina que permitía realizar un detallado análisis de error, basado en métodos estadísticos y físicos, tanto de los datos obtenidos durante el ensayo, como de los resultados de parámetros estimados durante el estudio. Esto permitía obtener una información de gran calidad para acotar la incertidumbre de los resultados que se obtenían para los resultados finales de las propiedades térmicas de la muestra estudiada.

Finalmente, la formación de un grupo formal de centros interconectados a través de la red, garantizaba el mantenimiento de todos los medios de ensayos al mismo nivel operacional y de desarrollo, gracias a la aplicación de los mismos estándares de calidad y trazabilidad^[304]. La red estaba formada por doce centros de investigación, distribuidos en diez países a lo largo de toda Europa, con un total de 35 celdas de ensayo activas^[148, 403].

PASLINK EEIG (1994):

En 1994 la red *PASLINK* se convirtió en *EEIG (European Economic Interest Gruping)*, a la vez que se realizaba un nuevo esfuerzo de desarrollo de la metodología, esta

vez centrado en la mejora de las herramientas de identificación de parámetros aplicada a los ensayos en régimen dinámico. Este trabajo se realizó en forma de una competición oficial denominada *SIC I (System Identification Competition I)*^[182, 215, 342], en la que se buscaba obtener la mejor herramienta de identificación, partiendo de una serie de casos prácticos correspondientes a diferentes tipologías de muros, y con condiciones de medida ajustadas a las situaciones reales. Por tanto se trabajaba con señales que presentaban ruido, como el propio de los sensores de medida, y se generaban casos particulares como la rotura de ciertas sondas. De esta competición se obtuvieron dos herramientas de alta calidad, el *LORD (Logical R Determination)*^[188] y el *CTSM (Continuous Time Stochastic Modelling)*^[61]. Posteriormente, se han realizado sucesivas competiciones, *SIC II* y *SIC III*. Entre los trabajos que desarrolló la red *PASLINK*, además de congresos, reuniones de trabajo, y transferencia de conocimiento mediante publicaciones científicas^[343], son de destacar el proyecto *PV HYBRID*, el ensayo de trazabilidad *IQ-Test*, y el proyecto *DAME-BC*.

PV HYBRID (1996):

En el proyecto *PV HYBRID (Hibryd Photovoltaics in Buildings)*^[5] se estudiaba la eficiencia energética aplicada a la edificación de fachadas fotovoltaicas ventiladas. El diseño de ensayo se basaba en un prototipo de fachada ventilada en la que la hoja exterior estaba formada por una capa semitransparente con células fotovoltaicas integradas. La ventilación forzada de la cámara de aire permitía refrigerar las células fotovoltaicas consiguiendo dos efectos positivos simultáneamente, la mejora de la eficiencia de la producción de energía eléctrica, y la generación de un aporte de calor mediante el precalentamiento del caudal de aire. A su vez, el alcance del estudio abarcaba la integración de los resultados en un modelo de edificio, de forma que se cuantificase la eficiencia energética del sistema para condiciones de diferentes países. Este proyecto es un buen ejemplo del potencial de ensayo de la metodología *PASLINK*.

IQ-Test (2000):

El proyecto correspondiente al *IQ-Test (Improvement Quality Test)*^[12, 172, 376, 378], se basaba en la realización de un ensayo interlaboratorios. Este trabajo representa una medida precisa de la trazabilidad y calidad de ensayo del conjunto de la metodología *PASLINK*. Los sucesivos proyectos *PASSYS* habían asegurado la calidad de los ensayos definiendo con precisión el conjunto de pasos y metodologías de trabajo, pero para terminar el análisis de incertidumbre era necesario realizar un ensayo de trazabilidad global. El ensayo se conformó en dos procesos, el primero consistía en la caracterización de un muro homogéneo de un material conocido, que se fabricaba en cada uno de los centros participantes, y el segundo consistía en la caracterización de una única probeta de ventana que circulaba por el conjunto de centros. Este ensayo permitió evaluar la capacidad de medida de cada uno de los centros por separado y cuantificar la precisión de la red en conjunto, obteniéndose unos resultados muy positivos.

DAME BC (2002):

En el proyecto *DAME BC (Dynamic Analysis and Modelling applied to Energy performance assessment and prediction of Buildings and Components)*^[3,4], además de la continuación de los trabajos de mejora de los métodos de identificación de parámetros, se buscaba acercar al conjunto de potenciales beneficiarios en el sector de la edificación, la experiencia en los conceptos físicos y matemáticos adquiridos durante los años y proyectos anteriores, haciendo más accesibles las herramientas desarrolladas, y ofreciendo servicios de soporte a todo el público. A su vez, se crearon diferentes unidades de apoyo para el resto de áreas

relacionadas con el ámbito de trabajo, entidades como *CEN (European Committee for Standardization)*, *ISO (International Organization for Standardization)*, otras redes como la *IEA*, etc ... Se creó la unidad *DASU (Data análisis Support Unit)*, formada por un grupo de expertos en modelado matemático y análisis estadístico para apoyo a proyectos de investigación y desarrollo avanzado. También se creó la unidad *PPSU (Performance Prediction Support Unit)*, que ofrecía el soporte para la integración de los resultados obtenidos de los ensayos de componentes a escala global de edificio.

DYNASTEE (2005):

Posteriormente, la red *PASLINK EEIG* se transformó en el grupo informal *DYNASTEE*, el cual pertenece como asesor técnico a la red *INIVE*, y continúa con los trabajos de investigación y desarrollo, manteniendo sus objetivos de transferencia de conocimiento al sector de la edificación y al público en general.

En el año 2009 el AT (*Área Térmica*), del *LCCE* inicia el proyecto *EGUZKI-ILARGI*, consistente en la instalación y puesta a punto de dos celdas *PASSYS*. La primera celda, *EGUZKI*, perteneciente a los modelos *PASSYS I*, está orientada únicamente al ensayo y caracterización de elementos verticales, mientras que la segunda celda, de la tipología *PASSYS II*, tiene la opción de caracterizar tanto componentes verticales como horizontales. Todos los trabajos de puesta a punto fueron supervisados por J.J. Bloem, uno de los principales responsables de la red *DYNASTEE*, y participante desde el principio en todo el desarrollo de la metodología *PASLINK*. Esta supervisión ha permitido dotar a las celdas del AT de todas las mejoras y últimos desarrollos obtenidos en el ámbito experimental de la red, como por ejemplo, la instalación del último modelo de sensores de flujo de calor *HFS Tiles*. A estas mejoras hay que sumar desarrollos propios de los técnicos del AT, mejorando aspectos como las infiltraciones, eliminación de puentes térmicos, movilidad de muestras, sensórica,... En el siguiente apartado se describen las principales características de la celda de ensayos *PASLINK-EGUZKI*, equipo con el que se han desarrollado los trabajos experimentales que conforman la presente tesis, a través de los trabajos de puesta a punto realizados y su instalación final.

1.1.2 Características de la celda *PASLINK-EGUZKI*

La celda *PASLINK* es básicamente un recinto de ensayo para la caracterización térmica de componentes de edificio. Este recinto se divide en una sala de ensayos con un elevado grado de aislamiento y una reducida masa térmica estructural, donde una de sus caras es intercambiable, para la colocación de la muestra a analizar, y una sala de servicio adyacente. En la Figura 1.2 se puede observar un esquema básico de la configuración de la celda. Esta sala de ensayo actúa como un calorímetro que permite medir con alta precisión el intercambio de calor, tanto ganancias como pérdidas, a través del componente bajo estudio y de la envolvente de la propia celda. En la sala de servicio se encuentran ubicados los equipos de medida y control. En la partición que separa ambos recintos se ubica la puerta de acceso a la sala de ensayos, que dispone el mismo espesor de aislamiento térmico que la envolvente de la sala de ensayos y un sistema de cierre y junta de sellado que asegura unas infiltraciones de aire reducidas. Esta configuración de la celda permite acceder al equipo de control durante la ejecución de los ensayos sin afectar las condiciones de la sala de medida. En los siguientes apartados se muestran las características estructurales y de los materiales que configuran el diseño original de la celda *PASLINK-EGUZKI*, junto a las modificaciones que se realizaron durante los trabajos de puesta a punto de la misma.

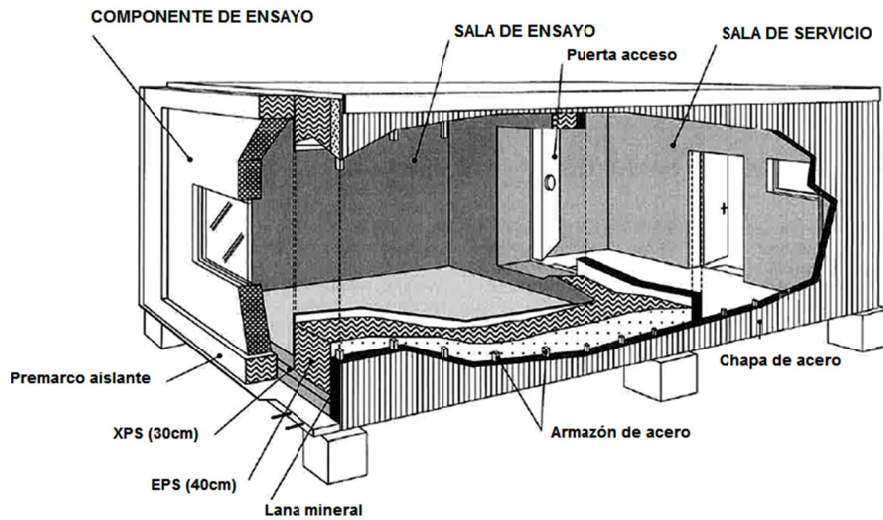


Figura 1.2 – Configuración general de la celda PASLINK y fotografía de las celdas ILARGI y EGUZKI del LCCE

1.1.2.1 Estructura de la celda

La estructura base de la celda está formada por un esqueleto de perfiles de acero, que trasladan los esfuerzos mecánicos a la bancada inferior de mayor resistencia. Este esqueleto está configurado en base a pórticos paralelos, ver Figura 1.3. Para evitar posibles puentes térmicos entre la estructura metálica y la envolvente interior de la sala de ensayos se dispone una primera capa de aislamiento, formada por planchas de lana de roca, de 8 [cm] de espesor, que rodean por completo las vigas de acero. La cara interior se remata con planchas de madera hidrófuga. Sobre estas planchas de madera se coloca el aislante que conforma las paredes interiores de la sala de ensayos. Esta capa está formada por poliestireno expandido de 26 cm y 40 cm de espesor, para el techo y paredes laterales respectivamente, y 30 cm de poliestireno extruido para el suelo. Finalmente el aislante se protege con otra capa formada por planchas de madera. En la Figura 1.4 se puede ver un esquema constructivo de la sección superior e inferior de la envolvente de la sala de ensayos. En el sistema original de construcción se remató la superficie interior de la sala de ensayo con planchas metálicas para darle

robustez. Por el exterior, la celda está revestida con planchas de acero tratado para proporcionar protección contra la lluvia, humedad ambiental, sedimentaciones, radiación solar, etc...



Figura 1.3 – Estructura portante y primera capa de aislamiento de lana de roca

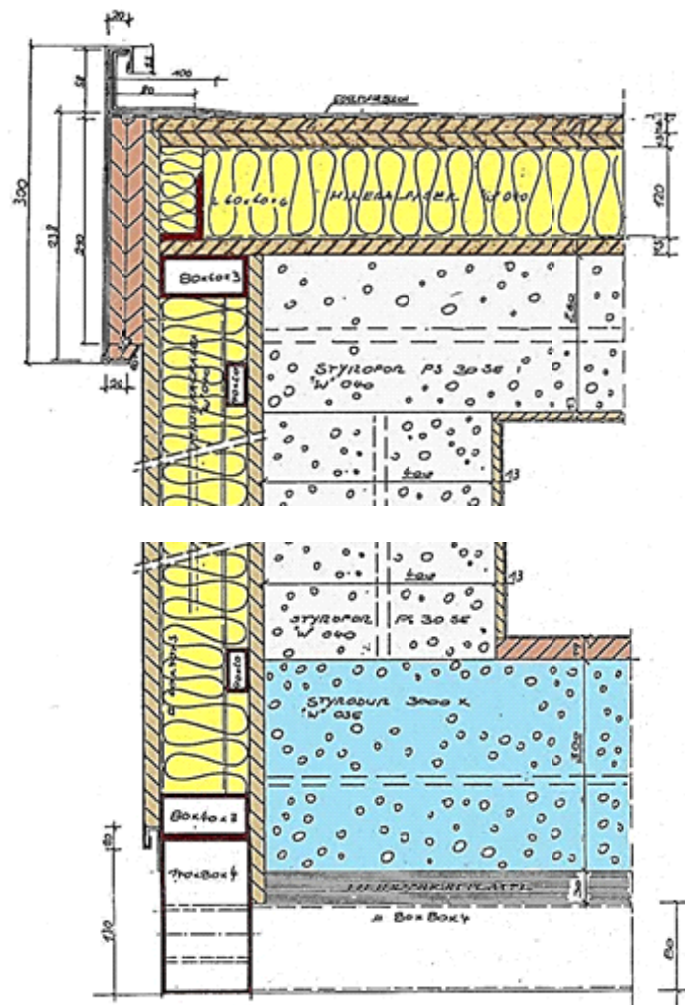


Figura 1.4 – Sección de las paredes de la sala de ensayo con el esquema constructivo de materiales

Las características definidas anteriormente corresponden a la configuración estructural básica del primer modelo de celda correspondiente a la denominada *PASSYS I*^[2], a la cual pertenece la celda *EGUZKI* del *LCCE*. Esta celda llevaba más de dos décadas de operación, por lo que era necesario realizar trabajos de puesta a punto de la misma. Este hecho también ha permitido aprovechar la experiencia acumulada durante el uso de las celdas por la red *PASLINK* y aplicar modificaciones sobre la estructura que han mejorado las características experimentales de la misma. Una de las mejoras que se han llevado a cabo consiste en la reducción de los puentes térmicos de la sala de ensayos. El principal causante de estos puentes eran las chapas metálicas que revestían la superficie interior.



Figura 1.5 – Colocación de la primera capa de planchas de madera en la envolvente de la sala de ensayo y puerta de acceso, y detalle del sellado de juntas



Figura 1.6 – Capa plástica para control de infiltraciones en la sala de ensayos

Los primeros trabajos de rehabilitación han consistido en retirar dichas planchas de metal, se han sustituido también las planchas de madera que se encontraban por debajo y se ha cambiado el aislante que se encontraba en malas condiciones. Tanto en esta capa, como en el resto de capas de protección del aislante, se ha tenido especial cuidado en el sellado de juntas para reducir al máximo las infiltraciones de aire en la

sala de ensayos, ver Figura 1.5. Sobre esta primera capa de planchas de madera se ha colocado una envolvente plástica continua que conlleva a unas infiltraciones reducidas de la sala de ensayos, ver Figura 1.6.

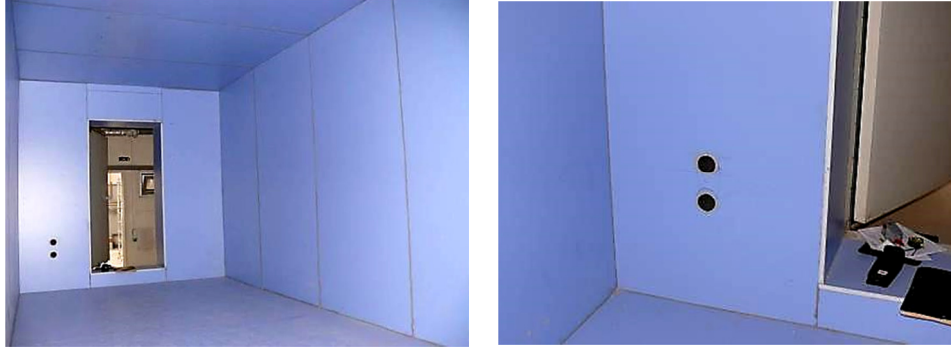


Figura 1.7 – Remate final de la superficie interior de la sala de ensayos y conductos de comunicación con la sala de servicio

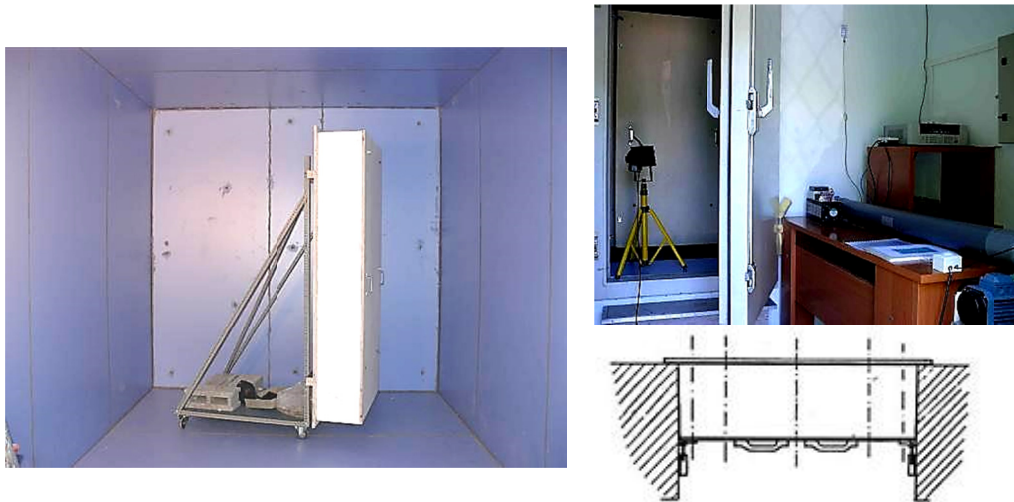


Figura 1.8 – Cierre del acceso a la sala de ensayos, por el interior de la misma, izquierda, y por el lado de la sala de servicios, derecha

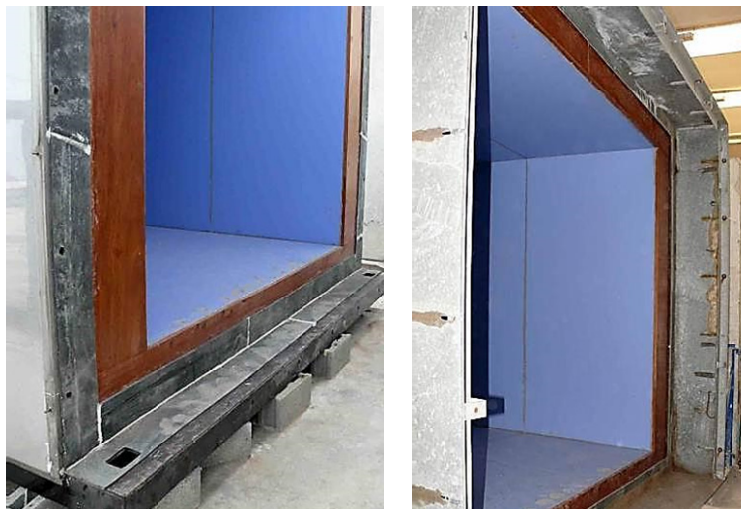


Figura 1.9 – Remate de la intercambiable de la sala de ensayos

Para proteger la capa plástica de sellado de infiltraciones se coloca una nueva capa de madera, y sobre ésta una capa final de contrachapado hidrófugo. Estas dos nuevas capas presentan un espesor final de 29 [mm], lo que permitirá la colocación de los sensores de flujo de calor, que recubrirán toda la superficie interior de la sala de ensayos, sin llegar a perforar en ningún momento la lámina plástica. Otra actuación que se ha realizado ha consistido en la reducción de los conductos de comunicación entre la sala de ensayos y la sala de servicios a únicamente dos y la puerta de acceso. Estos dos conductos se emplearán para el paso de las conexiones del sistema de medida y control, y para la colocación de la válvula que permitirá realizar las pruebas de presión que verifican el nivel de infiltraciones durante los ensayos.

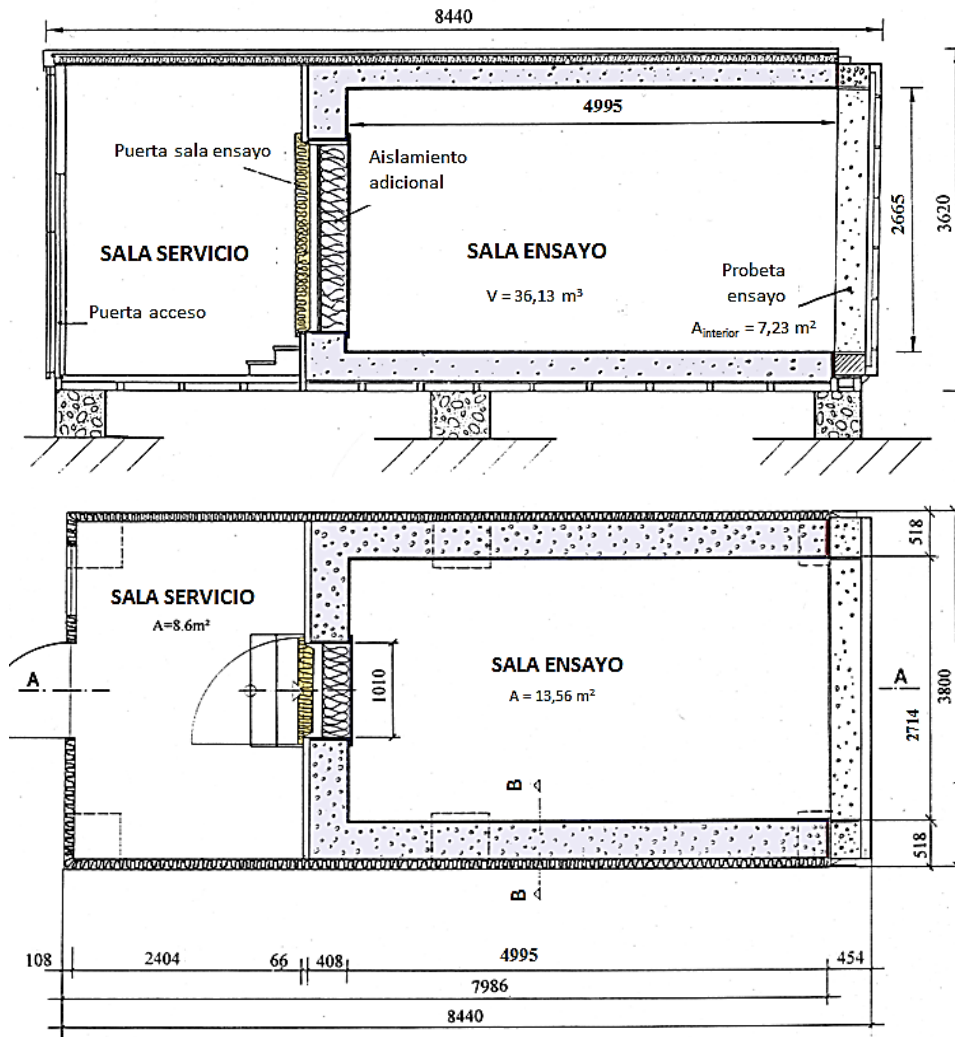


Figura 1.10 – Alzado y planta de la celda

El estado final en el que quedan las paredes del interior de la sala de ensayos se puede apreciar en la Figura 1.7. Un punto crítico, de cara a minimizar infiltraciones, es la puerta de acceso a la sala de ensayos. Como primer sistema de sellado se ha dispuesto de una pieza de aislante de 30 [cm] de poliestireno expandido, el mismo aislamiento que la envolvente. Esta pieza va montada sobre un sistema de ruedas que se desplazan por un carril y permiten su colocación exacta en el hueco de acceso, facilitando la apertura y cierre. El remate interior está fabricado con panel hidrófugo. Se ha dimensionado de forma que, una vez colocada en su hueco, la puerta y la superficie interior de la celda sean continuas en superficie y homogéneas en configuración

constructiva, evitando así la generación de flujos de calor bidimensionales. Esta situación permite obtener un mayor equilibrio en los flujos de calor que se producirán durante el ensayo, facilitando así su medida. Por el exterior se dispone de una puerta frigorífica, que realiza el sellado final respecto a las infiltraciones de aire. En las imágenes de la Figura 1.8, se puede ver la pieza de aislamiento complementario para el hueco de acceso a la sala de ensayos, y la puerta frigorífica exterior. Por último, el otro punto de gran importancia, es la zona sur de la sala de ensayos, donde se coloca la muestra. Para la construcción de la probeta, se dispone de un portamuestras desmontable de la estructura de la celda. El diseño del sistema de portamuestras es un punto que participa en gran medida en el ensayo y se describe con mayor detalle en el apartado 1.3.1. Para proteger las paredes aislantes de la celda durante los cambios de muestra, como remate, se ha colocado un frente de madera de alta dureza. En el perímetro exterior, zona en la que se disponen las roscas de amarre del portamuestras, se ha instalado también una banda elástica de apriete, que permite aumentar el grado de sellado frente a infiltraciones. En la Figura 1.9, se puede observar la pieza de madera de alta resistencia que protege la capa de aislante de la envolvente de la sala de ensayos, y la banda de neopreno que asegura el sellado, en la imagen de la izquierda. También se puede ver la situación final después de colocar el premarco metálico que forma la estructura exterior del sistema de portaprobetas, derecha.

Material	Características	Espesor [mm]	Conductividad [W/mK]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]
Aglomerado	-	13	0,10*	800*	1200
Contrachapado	-	21	0,11*	560*	1200
Lana de roca	Rockwool	80/120	0,038*	30*	840
Poliestireno expandido	Styropor W 040	260/400	0,035*	28*	850
Poliestireno extruido	Styrodur W 035	300	0,032*	34*	850

* valores medidos

Tabla 1.1 – Propiedades termofísicas de los materiales de la envolvente

	Resistencia [K/W]	Conductancia [W/K]	Capacidad [MJ/K]
cubierta	0.830	1.205	0.928
paredes	1.066	0.938	0.942
suelo	0.721	1.387	0.561
pared norte	1.963	0.510	0.512
esquina superior	-	-	0.173
esquina inferior	-	-	0.132
puentes térmicos	-	0.996	-
	0.167	5.973	4.497

Tabla 1.2 – Propiedades térmicas globales de la envolvente de la sala de ensayos

En la Figura 1.10 se muestra el alzado y la planta de la celda de ensayos con las dimensiones definitivas tras los trabajos de puesta a punto de la envolvente. El corte representado en la Figura 1.4 correspondería a la sección B-B. Una vez definida la estructura de la sala de ensayos se ha realizado el cálculo teórico de la transmitancia y capacidad térmica de la celda. Conocer estos valores es importante de cara a determinar la potencia eléctrica de calentamiento necesaria para los ensayos y estimar

el comportamiento térmico de la celda. En la Tabla 1.1 se recogen las propiedades termofísicas de los principales materiales que conforman la envolvente de la sala de ensayos, valores que se han empleado para el estudio. Los valores de conductividad térmica se han medido según las normas *EN 12664*^[8, 9] y *EN 12667*^[10], los valores de densidad según la norma *EN 1602*^[11]. La resistencia térmica de cada una de las caras de la envolvente se determina sumando la resistencia parcial de las capas que la configuran, más los efectos de borde. Para la estimación del efecto de puente térmico debido al cambio de geometría en los bordes se toma como referencia el encuentro entre cubierta y pared lateral, ya que es uno de los más representativos. Se calcula la transmitancia térmica lineal, Ψ [W/mK], aplicando la metodología indicada en la norma *ISO 10211*^[84], mediante cálculo por volúmenes finitos, usando la herramienta *Fluent 6.2*[®]. El valor estimado para la transmitancia lineal es de $\Psi = 0,024$ [W/mK]. El análisis y medida de los efectos de borde se desarrolla más ampliamente en el apartado 2.2.2. El valor final que se obtiene para la conductancia de la envolvente de la sala de ensayos es de $H_A = 5,95$ [W/K], y la capacidad térmica total es de $C_A = 8,12$ [MJ/K], ver Tabla 1.2. Estos valores implican una constante de tiempo del orden de $\tau = R \cdot C = 7,7$ [días]. Este valor permite estimar el tiempo de respuesta de la celda y compararlo con el de las muestras de ensayo y, de esta forma, tomar una referencia para la definición de la frecuencia de las rutinas de ensayo y la duración de los mismos.

1.1.2.2 Instalación de la celda EGUZKI

La celda está ubicada en las instalaciones del LCCE, situado en la ciudad de Vitoria Gasteiz, País Vasco, España. En la Figura 1.11 se puede ver una imagen aérea de dichas instalaciones, con la localización de las dos celdas *PASLINK*, *EGUZKI* e *ILARGI*, que dispone el AT. Las características climatológicas de la ciudad, temperatura ambiente media y radiación global horizontal, para un año tipo, se muestran en la gráfica de la Figura 1.12. En la Tabla 1.3 se recogen los datos de coordenadas y altitud. Las celdas *PASLINK* están instaladas en la zona este del laboratorio, en un patio posterior a los edificios de trabajo, sobre una solera de hormigón que permite el tránsito de grúas para facilitar el cambio y manipulación de muestras. La ubicación de las dos celdas de las que dispone el AT se ha seleccionada de forma que se minimicen los efectos de sombras del resto de edificios sobre las superficies de ensayo.

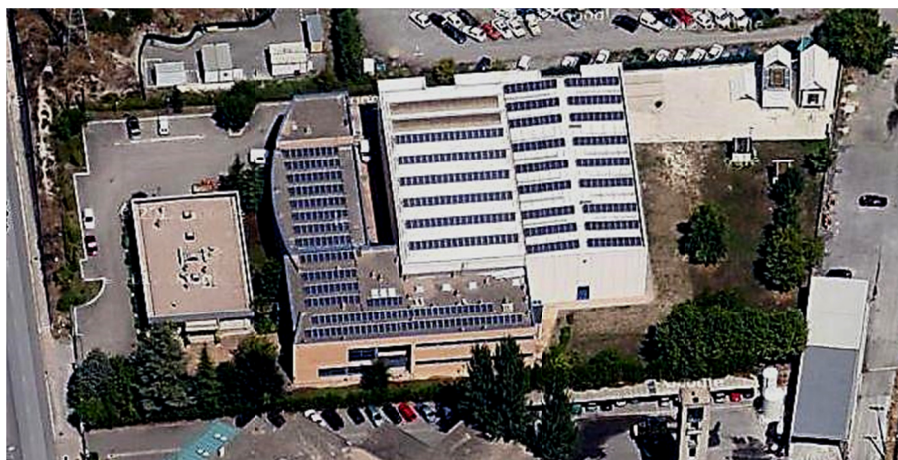


Figura 1.11 – Instalaciones del LCCE en la ciudad de Vitoria Gasteiz

En la Figura 1.13 se muestra el plano de posicionamiento de las mismas. La cimentación sobre la que se colocan las celdas consiste en seis zapatas de hormigón, de forma cúbica, con un lado de 1,6 [m], de las que arrancan unos pilares sobre los que apoya la celda. Estos pilares tienen una sección cuadrada de 0,5 [m] de lado, para las zonas de esquina, y un lado de 0,6 [m] en los dos pilares centrales. La elevación de las celdas sobre el suelo es de 0,5 [m], de forma que se reduce el efecto de la temperatura del terreno. Las celdas están instaladas de forma que la superficie de ensayo presenta orientación sur. Tanto la construcción de los pilares, como la colocación final de las celdas se han realizado mediante mediciones topográficas, obteniendo un posicionamiento respecto al sur geográfico con una incertidumbre inferior a $\pm 1^\circ$.

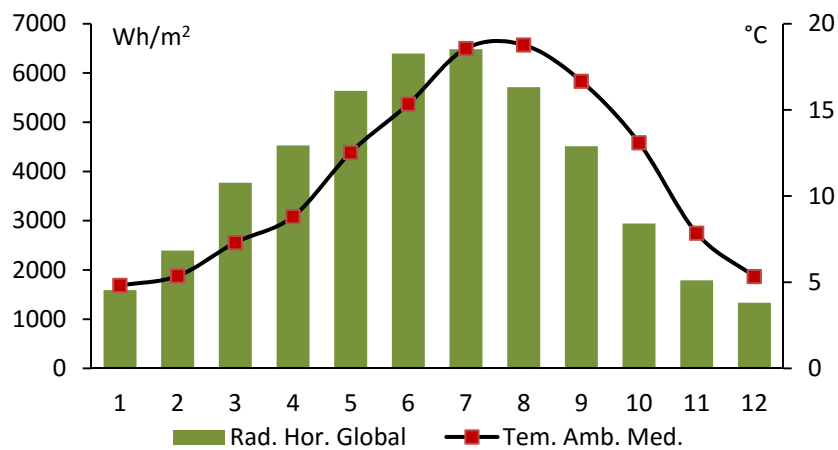


Figura 1.12 – Condiciones climáticas de la ciudad de Vitoria Gasteiz

Latitud	42° 51' N
Longitud	2° 41' O
Altitud	525 msnm

Tabla 1.3 – Coordenadas geográficas de la ciudad de Vitoria Gasteiz

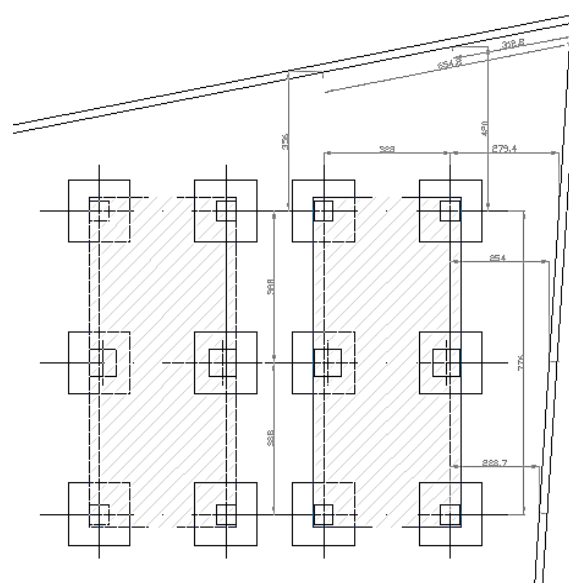


Figura 1.13 – Disposición de las dos celdas en las instalaciones del LCCE

En la Figura 1.14 se puede observar el hormigonado de la cimentación y la verificación posterior de la orientación de los pilares de apoyo. En la superficie de contacto entre los pilares y las celdas se colocan planchas de neopreno para mejorar el contacto y para generar una pendiente de $0,5^\circ$ tanto en la dirección S-N como O-E, para facilitar la evacuación de agua de lluvia sobre la cubierta y la muestra. En la Figura 1.15 se puede ver la instalación de la celda de ensayos *EGUZKI*, con el muro de calibración.



Figura 1.14 – Construcción de los cimientos y verificación de la orientación de los pilares de apoyo de la celda

Finalmente, como último componente de la instalación, se coloca un toldo que rodea las paredes de la envolvente de la sala ensayo y que homogeneiza las condiciones ambientales de las mismas. Esto es debido a que el toldo permite atenuar los efectos de la variabilidad horaria de la radiación solar sobre las paredes laterales, con orientación este y oeste, respectivamente, y la incidencia directa sobre la cubierta.



Figura 1.15 – Instalación de la celda *EGUZKI*

En la Figura 1.16 se puede ver la instalación final de las dos celdas de ensayos. *EGUZKI* corresponde a la celda situada a la derecha de la imagen, con un ensayo de ventana, e *ILARGI*, la celda situada a la izquierda, con un ensayo de cubierta.



Figura 1.16 – Instalación de las celdas de ensayos PASLINK del LCCE

1.2 Instrumentación

Una vez definida la estructura de la celda de ensayos, el siguiente punto en importancia es la instrumentación de la que está dotada. Todas las celdas PASLINK están equipadas con el mismo conjunto básico de sensores e idéntica colocación, definidos por el ITW (*Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik*) de Stuttgart y el JRC de Ispra. Así mismo, la denominación de los mismos es común, de forma que el intercambio de ficheros de datos se simplifique y no se dé lugar a errores de interpretación. Los requisitos de la instrumentación están recogidos en el Manual de Operación^[301], en el Manual de Procedimiento de Medida y Análisis^[217], y en el Manual de Calibración y Mantenimiento^[86,172,175,199,255,281,358,376,377,385]. Esta codificación, a su vez, permite, y exige, asegurar una trazabilidad en la documentación de calibración y uso de cada sensor referenciado. El objetivo con el que se ha definido la instrumentación con la que está equipada la celda es el de caracterizar:

- las condiciones interiores, tanto de la sala de ensayos como de la sala de servicio;
- las condiciones del ambiente exterior que rodea la celda y la muestra, y las condiciones climáticas generales.

En los siguientes apartados se describen las características de la instrumentación con la que está dotada la celda EGUZKI. Entre la misma, hay que destacar los sensores de flujo de calor que recubren toda la envolvente interior de la sala de ensayos. Estos sensores se denominan HFS Tiles.

1.2.1 Medida del flujo de calor, HFS-Tiles

Las HFS Tiles son sensores de flujo de calor desarrollados específicamente para su montaje sobre las celdas PASSYS por el TNO-Building and Construction de Holanda. El primer diseño se realizó en el proyecto COMPASS, como alternativa al sistema

pseudo-adiabático, con el objetivo de disponer de una medida precisa del flujo de calor intercambiado a través de la envolvente de la sala de ensayos. Este sistema simplifica en gran medida la complejidad del ensayo, ya que desaparece la incertidumbre de cálculo de los puentes térmicos, porque se cuantifican directamente. Las *HFS Tiles* aumentan en gran medida la precisión del ensayo y permiten centrar los esfuerzos en la medida de las condiciones ambientales. Las *HFS Tiles* instaladas en la celda *EGUZKI* han sido construidas por la empresa holandesa *Hukseflux Thermal Sensors*, en enero del 2009, y corresponden al último prototipo de sensores de flujo de calor, que incluyen los desarrollos de mejora obtenidos tras la experiencia adquirida durante el uso de los prototipos anteriores en el resto de celdas de la red. La unidad base con la que se configura el equipo de *HFS Tiles* consiste en una superficie de aluminio con unas dimensiones estándar de 530x530x3 [mm], que presenta un sensor de flujo de calor, de dimensiones 100x100x3 [mm], adherido en su parte posterior, ver Figura 1.17 .

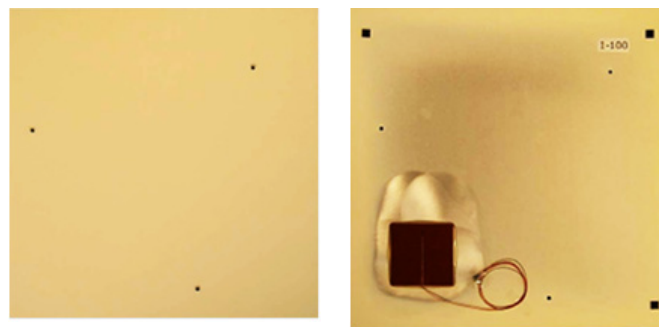


Figura 1.17 – *HFS Tile*, cara exterior, izquierda, cara interior con detalle del sensor de flujo de calor, derecha

La sensibilidad de las *tiles* es de $31,5 \pm 1.7$ [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$]. Para determinar dicho valor se calibran 25 *tiles*, tomándose el valor promedio como el factor de calibración para el total de sensores. La dependencia respecto a la temperatura del coeficiente de sensibilidad es de -0.14 [%/K]. En total, se disponen de 235 *tiles*, de las cuales 210 se sitúan en la envolvente de la celda de ensayos y 25 en el muro de calibración. Los sensores se conectan en serie, formando 21 grupos de medida, de los cuales 6 corresponden a la medida del flujo en la superficie central de las paredes, y 15 se sitúan en las zonas de borde para la medida del efecto de puente térmico. En la Figura 1.18 y Figura 1.19 se muestra un esquema de la disposición de los grupos en la sala de ensayo y en el muro de calibración colocado en la superficie sur, respectivamente, así como imágenes de la celda *EGUZKI* y del portamuestras con el muro de calibración.

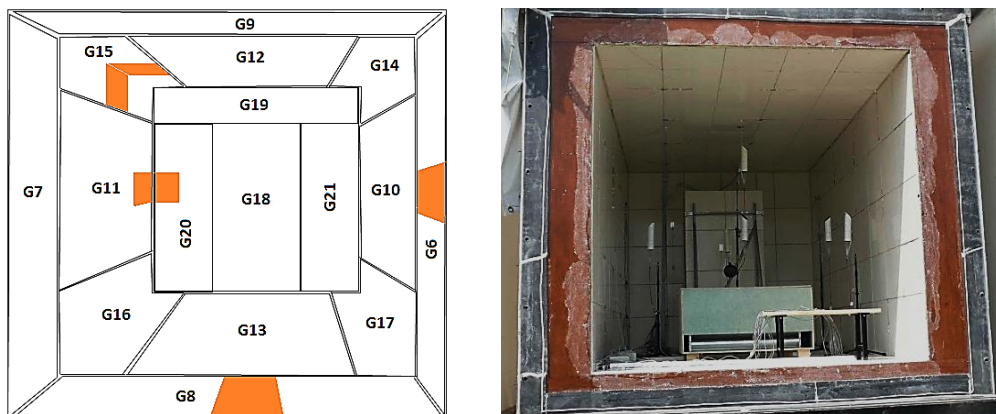


Figura 1.18 – Configuración de los grupos de *HFS Tiles* y situación de las *multitiles* de la sala de ensayo

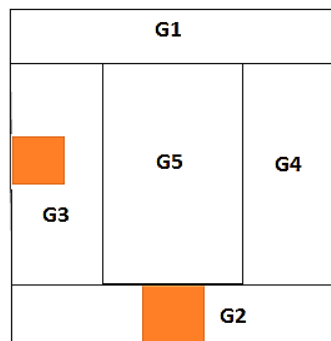


Figura 1.19 – Configuración de los grupos de HFS Tiles y situación de las multitiles del muro de calibración

Grupo	Ubicación	Nº Tiles	Superficie (m ²)
G1	Borde superior muro calibración	5	1.462
G2	Borde inferior muro calibración	5	1.462
G3	Borde este muro de calibración	3	0.841
G4	Borde oeste muro de calibración	3	0.841
G5	Superficie central muro calibración	9	2.460
G6	Borde pared este y muestra	5	1.436
G7	Borde pared oeste y muestra	5	1.436
G8	Borde suelo y muestra	5	1.462
G9	Borde techo y muestra	5	1.462
G10	Superficie central pared este	24	6.798
G11	Superficie central pared oeste	24	6.798
G12	Superficie central techo	24	7.014
G13	Superficie central suelo	24	7.014
G14	Borde pared este y cubierta	16	4.800
G15	Borde pared oeste y techo	16	4.800
G16	Borde pared oeste y suelo	16	4.800
G17	Borde pared este y suelo	16	4.800
G18	Puerta de acceso sala servicio	8	2.326
G19	Borde superior partición sala servicio	6	1.358
G20	Borde partición sala servicio y pared oeste	8	1.701
G21	Borde partición sala servicio y pared este	8	1.701
Superficie total			66.772

Tabla 1.4 – Configuración de los grupos de medida de las HFS-Tiles

El sensor de flujo de calor de las *tiles* se sitúa a 120 [mm] del borde de la placa de aluminio, y no en la zona central, ver Figura 1.17 . Esta disposición permite medir con precisión los efectos de borde. En la Tabla 1.4 se recogen las características de los grupos de medida. Las *tiles* se instalan con 1 [cm] de separación, de forma que no se cubre toda la superficie de la envolvente de la sala de ensayos. En total se cubren 66,772 [m²], esto representa una diferencia respecto a la superficie total menor del 2,5%, lo cual se tiene en cuenta en el proceso de calibración, que se describe en el *Capítulo 2*. Para la instalación, primero se colocan una serie de cables planos con conectores distribuidos a su largo, para el conexionado en serie. Posteriormente, se coloca una capa de material aislante comprimible, que asegura un buen contacto de la *tile* y evita la formación de cámaras de aire tras la superficie de medida, eliminando así

posibles efectos convectivos. El montaje de las *tilas* se realiza directamente sobre las planchas de contrachapado que recubren la superficie interior de la sala de ensayos, mediante tornillos y tacos de separación que disponen de juntas plásticas para reducir los puentes térmicos en la unión. En las imágenes de la Figura 1.20 se puede observar este proceso de montaje.



Figura 1.20 – Montaje de las HFS Tiles y detalle del sistema de conexión en serie

Para aumentar la precisión de la medida de los flujos de borde, en cada tipología de esquina se dispone de una *multitile*. Estas *tilas* disponen de tres sensores de flujo de calor, de izquierda a derecha A, B y C según la Figura 1.21. Los sensores de estas *tilas* están dispuestos a una distancia del borde de 30 [mm] el *sensor A*, 120 [mm] el *sensor B*, sensor que participa del grupo en el que está instalada la *multitile*, y 430 [mm] el *sensor C*. Esta configuración implica que los flujos medidos son de la forma $\phi_A > \phi_B > \phi_C$. El registro de estas tres señales permite caracterizar el perfil del flujo de calor en la zona de distorsión del campo de temperaturas. Para entender el interés de la ubicación de los sensores se muestra el perfil del flujo de calor en las proximidades del encuentro entre cubierta y pared, obtenido del estudio desarrollado en el *Capítulo 2*. Como se observa, el *sensor A* estaría midiendo un flujo mayor del 100% al flujo unidimensional, el *sensor B* un flujo del 20% mayor, y el *sensor C* el flujo unidimensional, ver Figura 1.22. El efecto de borde no alcanza más allá de los 400 [mm]; ésta es la razón de las dimensiones de las *tilas*, de forma que los grupos de borde lo registran por completo, mientras los grupos centrales no se ven influenciados por dicho efecto, el cual está afectado por la geometría y por las características térmicas de los materiales que lo conforman. En base a esto, dentro de la celda se distinguen cuatro tipologías diferentes, clasificadas por orden de importancia:

- Tipología 1: corresponde a las esquinas longitudinales, que implican los efectos de borde con mayor longitud y por tanto con mayor peso en la medida del flujo total de la envolvente de la sala de ensayos. Para cuantificarlos se emplean las *multitiles* situadas en el grupo 15.
- Tipología 2: corresponde a los bordes laterales y superior de la cara sur, en el encuentro de la zona de unión entre la estructura de la sala de ensayos y el sistema de portamuestras. Estos efectos son complejos, ya que se dan en un lugar de la celda en el que se produce cambio de la geometría y además están sometidos a las máximas diferencias de temperatura entre ambientes. Para cuantificarlos se emplea la *multitile* situada en el grupo 6.
- Tipología 3: corresponde al borde inferior de la cara sur, en el encuentro de la zona de unión entre la estructura de la sala de ensayos y el sistema de

portamuestras. Esta zona se analiza por separado al resto de bordes de la cara sur, debido a que hay un cambio tanto en los materiales del suelo de la celda, como de la parte inferior del portamuestras. Para cuantificarlo se emplea la *multitile* situada en el grupo 8.

- Tipología 4: corresponde al encuentro entre la cara norte, pared de separación con la sala de servicio, y la cubierta y paredes laterales de la sala de ensayo. Para cuantificarlos se emplean las *multitiles* situadas en los grupos 11 y 20. Estos efectos de borde son los menos influyentes, ya que son los que están sometidos a saltos de temperatura menores, y corresponden a los flujos unitarios de menor amplitud.

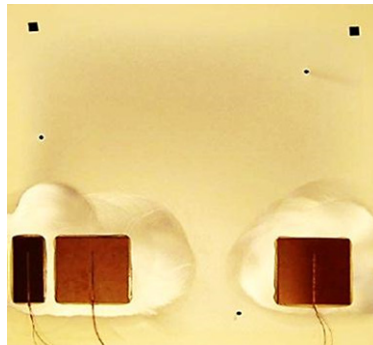


Figura 1.21 – Detalle de los sensores de las *multitiles*

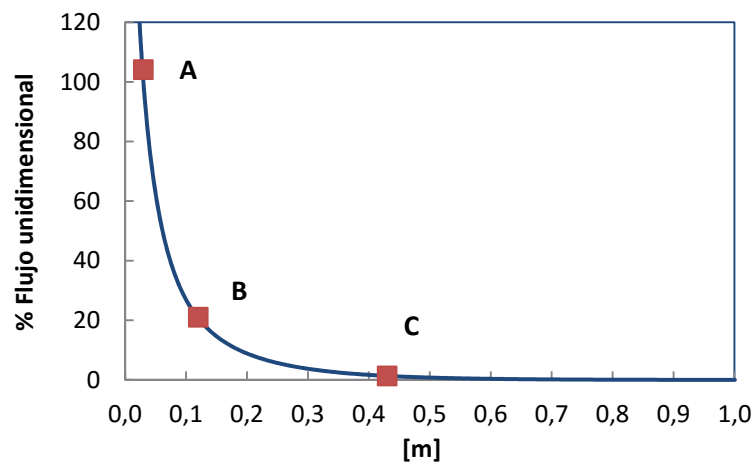


Figura 1.22 – Flujos de calor medidos por los sensores de las *multitiles*

La precisión en la medida del flujo de la envolvente de la sala de ensayos afecta directamente a la incertidumbre de caracterización de la muestra. Por tanto, como primer paso en la metodología *PASLINK*, se lleva a cabo un ensayo de calibración, que permite verificar y ajustar la medida del flujo de las *tiles*. Para realizar dicho ensayo se emplea una muestra de similares características térmicas a las de la envolvente de la sala de ensayos y se le instalan *tiles*, correspondientes a los grupos del 1 al 5, de forma que el flujo que atraviesa toda la superficie interior esté completamente medido. Debido a que en el muro de calibración también se generan efectos de borde en las zonas próximas al portamuestras, para cuantificarlos, se emplean las *multitiles* correspondientes a los grupos 2 y 3. En las imágenes de la Figura 1.18 y Figura 1.19 se puede observar la disposición del total de las *multitiles*, que se representan sombreadas. Una vez realizada la calibración, los grupos que se emplean para el resto

de ensayos de componentes corresponden a los grupos que van del 6 al 21, instalados en las paredes de la envolvente de la sala de ensayos.

1.2.2 Instrumentación de la sala de ensayos

Para la caracterización de las condiciones interiores de la celda, se miden las siguientes variables:

- temperatura de aire
- temperatura de superficies
- potencia consumida en el calentamiento y agitación del aire
- flujos de calor a través de la envolvente
- infiltraciones de aire

En la Tabla 1.5 se muestran las características técnicas de los instrumentos de medida empleados en la celda *EGUZKI*.

Parámetro	Unidades	Tipo de sensor	Nº sensores	Incertidumbre
Temperatura	°C	PT100, clase A, conexión 4 hilos	14	± 0,2 °C
Flujo calor	W	HFS Tiles	210	± 0,5 W
Potencia eléctrica	W	Vatímetro monofásico SINEAX 536	1	± 0,2 %
Presión diferencial	Pa	Ahlborn, FD8612DPS/APS	1	± 0,5 Pa
Humedad relativa	%	Transductor chip	1	± 3 %

Tabla 1.5 – Características técnicas de la instrumentación de la sala de ensayos

La medida de la temperatura de aire del interior de la sala de ensayos es un parámetro fundamental, tanto en la metodología de ensayos, como en el proceso de validación de modelos; por tanto, su adecuada medida y verificación es muy importante. Uno de los requisitos del ensayo es conseguir unas condiciones homogéneas en el volumen de aire de la sala de ensayos, de forma que se pueda caracterizar ésta con un único vector de temperatura. Para verificar dicha homogeneidad se analiza el gradiente de temperatura en un plano horizontal, a media altura, y en el eje vertical central. En total, se emplean 7 sondas, y se toma como valor de temperatura de aire el valor medio, siempre que se cumpla la condición de que la diferencia máxima entre dos puntos sea $T_{\max} < 0,5$ °C. Los sensores empleados son termoresistencias tipo Pt100 clase A, las cuales miden mediante una configuración a 4 hilos, lo que corrige la resistencia de los hilos de conexión. Esta configuración permite obtener una alta precisión en la medida de la temperatura, no superando la incertidumbre de medida los $\pm 0,2$ °C, valor exigido por los procedimientos *PASLINK*.

Junto con los requisitos de las prestaciones propias de las sondas, hay que tener especial atención en su montaje, de forma que no se vean afectadas por efectos de radiación. Con este fin, la red *PASLINK* ha desarrollado un sistema de apantallado mediante dos cilindros concéntricos. El protector exterior, con un diámetro adecuado para asegurar la ventilación de la sonda, está pintado de blanco por el exterior y de negro por el interior. El cilindro interior, está revestido con una imprimación de baja emisividad. El sistema de apantallado se puede ver con detalle en la Figura 1.23, junto a la disposición de las sondas de aire en la sala de ensayos. Las sondas de aire están envarilladas, con una vaina metálica de 15 [cm] de longitud. Las sondas de medida de temperatura superficial presentan una configuración en lámina, con el hilo de platino

distribuido a lo largo de toda la superficie de medida. Se encuentran dispuestas en cada una de las caras de la sala de ensayo, enfrentadas a las sondas de aire, salvo en la pared norte, en la que se dispone de una sonda central, como en el resto de paredes, y una sonda lateral, en la superficie que rodea la puerta de acceso. En la Figura 1.18 se puede apreciar la colocación de las sondas en la celda EGUZKI.

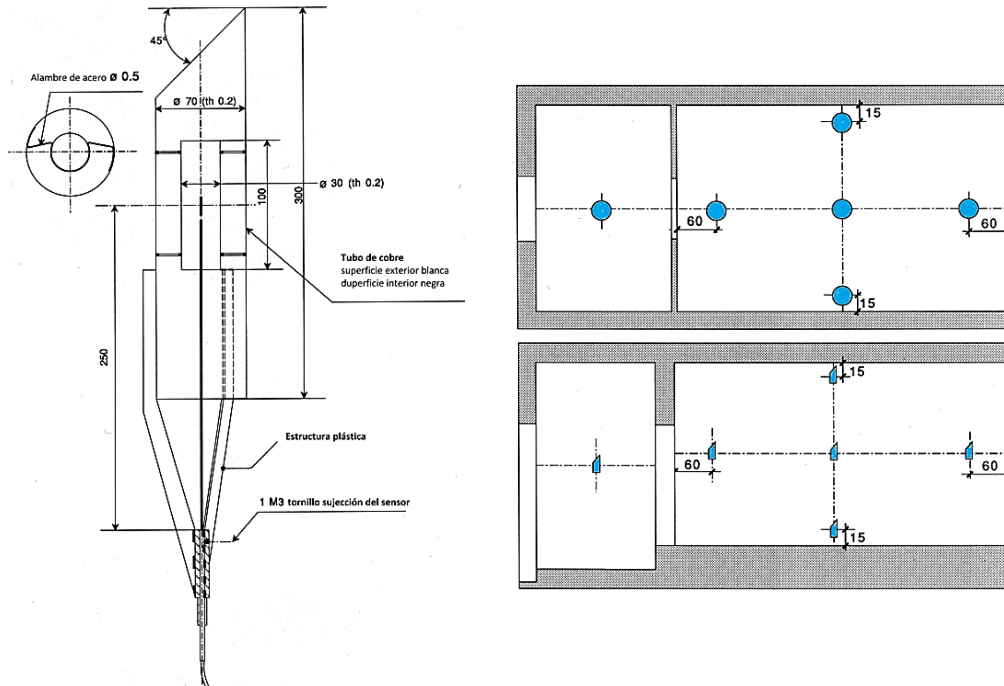


Figura 1.23 – Distribución de las sondas de temperatura de aire en la sala de ensayos y detalle del sistema de apantallado frente a la radiación

R₀	100Ω ± 0,05Ω
α	0,003850 ± 0,00005
Estabilidad	0,010 Ω/año
Intensidad nominal	1 mA
Error a 1mA	0,004°C

Tabla 1.6 – Especificaciones de la sonda de referencia

Rango temperaturas	45°C por debajo de ambiente a +140°C
Estabilidad absoluta	±0,025°C
Uniformidad	±0,005°C
Volumen de calibración	65 mm (diámetro) 160 mm (profundidad)

Tabla 1.7 – Especificaciones del baño de calibración

Las sondas de temperatura se calibran anualmente mediante baño de inmersión, según el Procedimiento de Calibración^[375] de la reglamentación PASLINK. Como patrón de referencia se emplea una termoresistencia de resolución $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$, calibrada cada dos años mediante patrón trazable internacionalmente. El rango de calibración va de 0°C a 60°C . La calibración se realiza *in situ*, de forma que se determina la incertidumbre total de la cadena de medida completa, sonda, cable de conexión y adquirente, ver Figura 1.24. Se dispone de registro de calidad de cada ensayo de calibración. Las características de la sonda patrón de temperaturas y del baño de calibración se recogen en la Tabla 1.76 y en la Tabla 1.7. Para asegurar la homogeneidad de las lecturas y facilitar el proceso de calibración, todas las sondas pertenecen al mismo suministrador y al mismo lote de fabricación. Como sistema de medida y adquisición de datos se emplea un multímetro modelo Agilent 34980^a, con tarjetas multiplexoras 34921^a y terminales de conexión 34921T. Las características del multímetro se muestran en la Tabla 1.8. El periodo de muestreo durante la ejecución del ensayo es de 1 [min], y se aplica un filtro integrativo a la señal que elimina el ruido asociado a componentes de alta frecuencia.

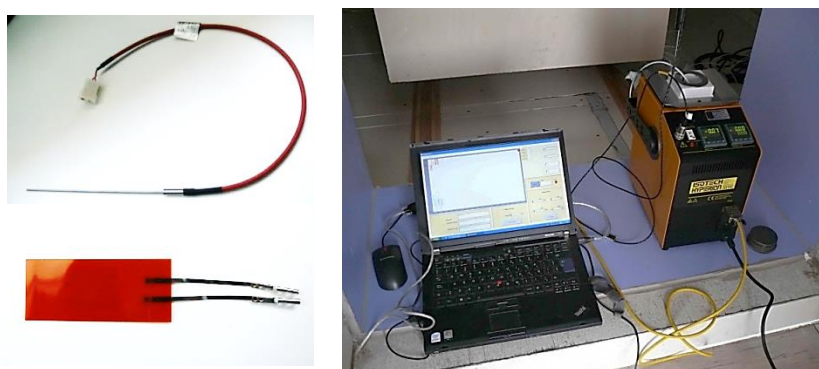


Figura 1.24 – Sondas de temperatura y proceso de calibración

FUNCIÓN	RANGO	RESOLUCIÓN	ERROR
Tensión DC	100 mV	0,1 μV	4 μV
	1 V	1 μV	7 μV
	10 V	0,01 mV	0,05 mV
	100 V	0,1 mV	0,6 mV
	300 V	0,1 mV	9 mV
Intensidad DC	10 mA	0,01 μA	2 μA
	100 mA	0,1 μA	5 μA
	1:00 AM	1 μA	100 μA
Resistencia	100 k Ω /1mA	0,0005 Ω	0,005 Ω
	1 M Ω /1mA	0,0001 Ω	0,005 Ω
	10 M Ω /100 μA	0,0001 Ω	0,005 Ω

Tabla 1.8 – Especificaciones del sistema de adquisición y medida

En la ejecución de los ensayos, junto a la temperatura, la variable de mayor importancia es la medida de la potencia introducida en la sala de ensayos. La rutina de ensayo se basa en la generación de una señal de potencia aleatoria que permite desacoplar el comportamiento térmico del volumen interior de las condiciones ambientales exteriores. La celda EGUZKI trabaja con calentamiento de la sala de ensayos, lo cual se realiza mediante una resistencia eléctrica pura, controlada

mediante un relé que actúa en función de una señal de control inyectada por el propio adquirente de datos. Junto al sistema de calefacción, el otro sistema que consume energía en el interior de la sala de ensayos, es un ventilador tangencial, de 1m de longitud, que permite asegurar la homogeneidad de temperaturas. Para obtener una medida precisa de la energía introducida, sólo existe un cable de potencia que entra en la sala de ensayos y que se registra mediante un vatímetro monofásico. La potencia consumida por el ventilador es del orden de 40 [W] y el rango de potencias de calefacción empleadas en los ensayos va de los 250 [W] a 500 [W]. Al disponerse de un único cable de potencia, todos los dispositivos que necesiten fuente de alimentación, y disipen energía en el volumen de ensayos, por pequeña que sea, se cuantifica. Tanto el calefactor como el ventilador tangencial se encuentran ubicados dentro de un cajón de paredes opacas, con un volumen del orden de 1 [m³]. Esto permite que la disipación de calor no sea puntual, mejorando la homogeneidad de temperaturas, y evitando que las *tiles* próximas midan una mayor tasa de flujo de calor debido al intercambio de energía por radiación de onda larga.

Otra exigencia importante del ensayo *PASLINK* es el control de las infiltraciones de la sala de ensayos. La cuantificación, durante la ejecución de los ensayos, de la energía intercambiada por infiltraciones es compleja, y presenta gran incertidumbre. La forma de minimizar este efecto es trabajar con infiltraciones reducidas, e introducir su efecto mediante un término de error en los resultados finales. El requisito es disponer de un valor de renovaciones en la sala de ensayos inferior a 0,5 [ren/h], a una diferencia de presión de 50 [Pa]. Ello implica un efecto de las infiltraciones menor del 0,5% en la energía intercambiada en la sala de ensayos. Para determinar este término se dispone de una soplante reversible y un sensor de presión diferencial. La determinación de las infiltraciones se realiza en condiciones de sobrepresión y de subpresión respecto al ambiente exterior. El estudio de infiltraciones se realiza antes del inicio del ensayo y tras su finalización, para verificar que no se ha producido ningún deterioro en el sellado de juntas. La presión diferencial se registra de forma continua durante la ejecución del ensayo, como sistema de control complementario.

1.2.3 Medida de las condiciones exteriores

Para caracterizar las condiciones ambientales exteriores que se dan durante el ensayo, las variables que se registran son las siguientes:

- componentes de la radiación solar:
 - radiación global sobre superficie horizontal
 - radiación difusa sobre superficie horizontal
 - radiación global sobre superficie vertical, orientación sur
- velocidad y dirección de viento
- temperatura ambiente
- presión y humedad ambiental
- temperatura ambiente y superficial en la sala de servicio

En la Tabla 1.9 se muestran las características técnicas de la instrumentación. La instrumentación que registra las condiciones ambientales se puede dividir en dos grupos: los sensores que registran las condiciones de la muestra de ensayos y los sensores que miden las condiciones ambientales globales del entorno. Las condiciones ambientales bajo las que se encuentra la probeta de ensayo se miden mediante sensores que se sitúan sobre la propia muestra, o sobre un trípode situado a dos metros de la muestra y a una altura correspondiente al eje horizontal medio de la misma. Las condiciones globales del ambiente se miden a una altura de 10 [m]. La

medida de la radiación que recibe la probeta es importante para poder caracterizar la ganancia solar. Para un análisis detallado de dicha variable es necesario disponer de las diferentes componentes de la radiación solar. Para registrar dichas componentes se dispone de tres piranómetros, dos que registran la radiación incidente sobre la superficie horizontal y un tercero que mide la componente sobre la superficie vertical. Los piranómetros de radiación horizontal miden la incidencia global y la incidencia difusa mediante la colocación de un anillo que da sombra sobre uno de ellos, estando situados a la altura de la cubierta de la celda.

Parámetro	Unidades	Tipo de sensor	Nº sensores	Incertidumbre
Temperatura	°C	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	± 0,2 °C
Radiación solar	W/m ²	Kipp and Zonen CMP11	3	± 3 %
Anemómetro	m/s	Ahlborn FVA-615-2 / Meteo Multi FMA510	2	± 0,5 / ± 0,3 m/s
Dirección de viento	° N	Ahlborn FVA-614-9-30 / Meteo Multi FMA510	2	± 5 ° / ± 3 °
Presión barométrica	bar	Meteo Multi FMA510	1	± 0,5 mbar
Humedad relativa	% rH	Meteo Multi FMA510	1	± 3 %
Precipitación	mm	Meteo Multi FMA510	1	± 5 %

Tabla 1.9 – Características técnicas de la instrumentación ambiental



Figura 1.25 – Solarímetros para la medida de las diferentes componentes de radiación



Figura 1.26 – Sondas de temperatura frente a la muestra y condiciones ambientales a 10 [m] de altura

El piranómetro vertical se sitúa sobre la superficie sur, sobre la propia muestra, de forma que se mide con precisión la radiación total a la que está sometida la misma. En las imágenes de la Figura 1.25 se puede observar la instalación de los piranómetros. La temperatura de ambiente a la que está sometida la muestra es otro parámetro fundamental, ya que participa en gran medida en el estudio de pérdidas de calor, y por tanto, en la determinación de la transmitancia del componente. La problemática en la medida de esta variable es la distorsión sobre la temperatura registrada que genera la incidencia solar. Para evitar este efecto, la Pt100 que mide la temperatura ambiental se coloca dentro de un protector y se ventila de forma mecánica. Esta sonda se coloca delante de la muestra, a 2 [m] de distancia, a una altura media. Junto a la sonda de temperatura se miden velocidad y dirección de viento, que permiten valorar los coeficientes de convección y la evolución de las infiltraciones durante el ensayo.

Finalmente, de acuerdo con las recomendaciones generales de medida de variables ambientales, se dispone de una estación meteorológica, situada a 10 [m] de altura, que registra el conjunto de variables, como son la presión barométrica, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección de viento. Los datos registrados por la estación meteorológica se emplean como contraste y control del resto de variables exteriores. En la Figura 1.26 se muestran imágenes de los sensores que se sitúan delante de la muestra y de la estación meteorológica.

1.3 Probetas de ensayo

Una vez definida la celda de ensayos, el siguiente punto que participa en la cadena de calidad de ensayo, son las características de la probeta y del sistema de montaje de la misma. En este apartado se definen tanto el sistema de portamuestras y el proceso de fabricación de las mismas, junto con un apartado final en el que se describen las características técnicas de la instrumentación adicional de la muestra que se emplea en el conjunto de ensayos realizados en el presente trabajo.

1.3.1 Sistema de portaprobetas

Como se puede observar en la imagen de la Figura 1.2, la celda *PASLINK* dispone de un sistema de portamuestras desmontable en la cara sur. Esto permite la ejecución de las probetas más pesadas en el interior de un pabellón, como es el caso del *LCCE*, asegurando, por un lado, la calidad de la construcción, y por otro, la instalación de la instrumentación sin dañar la sensórica propia de la celda. El primer prototipo de sistema de portaprobetas fue desarrollado por el *BBRI (Belgium Building Research Institute)*, y el diseño final fue adoptado por el grupo de desarrollo de la celda de ensayos. El sistema de portamuestras no tiene únicamente un interés de montaje, también participa, en gran medida, en el proceso de caracterización de la muestra de ensayo. En la unión entre muestra y portamuestra se produce un efecto de puente térmico que afecta al intercambio del flujo de calor de la sala de ensayos. Para conseguir ambas prestaciones, el sistema de portamuestras está formado por un premarco metálico, que proporciona las características mecánicas, dentro del cual se dispone de un premarco aislante, sobre el que se fabrica la probeta. En la Figura 1.27 se puede ver una sección transversal de la celda correspondiente a la zona de unión del portamuestras con la estructura de la sala de ensayos, junto con una imagen del portamuestras durante la ejecución de un montaje de probeta. El premarco aislante está formado por un anillo relleno del mismo material que forma las paredes de la sala

de ensayo, poliestireno expandido, salvo en la base, en la que se emplea vidrio celular, para obtener mayor capacidad portante. El premarco aislante, que coincide en dimensiones con la sección de la cara sur de la celda de ensayo, tiene un espesor de 0,4 [m], lo que permite ejecutar un amplio abanico de muestras. En la Figura 1.28 se puede observar un corte transversal del portamuestras instalado en la estructura de la celda, donde se aprecia la sección del premarco aislante, así como la fabricación del mismo.

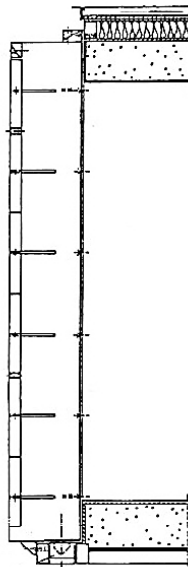


Figura 1.27 – Sistemas de portaprobetas de la celda PASLINK

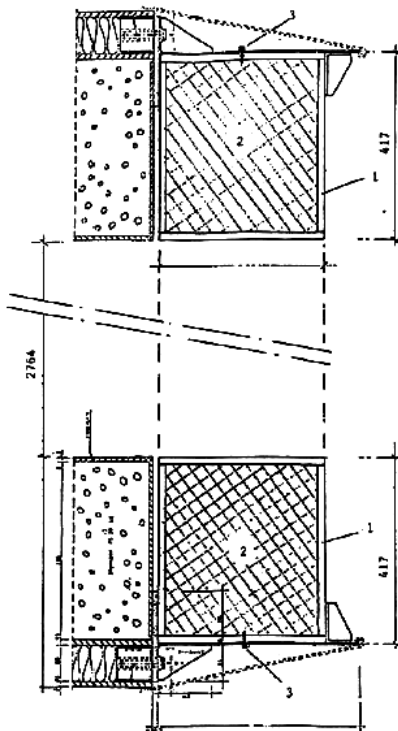


Figura 1.28 – Configuración del premarco aislante



Figura 1.29 – Proceso de montaje del premarco aislante en el interior del premarco metálico y sellado de juntas

El aislamiento va revestido de placas de contrachapado hidrófugo para protegerlo de las condiciones ambientales, y se le aplica una pintura protectora de color blanco, como remate final. El premarco aislante va embebido dentro del premarco metálico, y adecuadamente sellado. En las imágenes de la Figura 1.29 se puede observar el proceso de montaje de ambos premarcos. El premarco metálico está construido con chapas de acero galvanizado de 6mm de espesor, y dispone de varias roscas externas perimetrales que permiten anclar sistemas de soporte complementarios para muestras muy pesadas, de forma que no se sobrepase en ningún caso la capacidad portante del premarco aislante, y a su vez, permiten instalar cables de seguridad para el movimiento de las muestras sin riesgo.



Figura 1.30 – Juntas de sellado de la estructura de la celda y detalle de los pernos de anclaje del portaprobetas

El portamuestras se sitúa sobre la bancada que forma la base de la celda de ensayos, y su colocación se guía mediante dos bulones situados en la base del premarco metálico. El anclaje del portamuestras a la estructura de la celda se realiza mediante pernos dispuestos perimetralmente a lo largo del premarco metálico. Para asegurar el sellado y la limitación de las infiltraciones, en la zona perimetral de fijación está instalada una banda elástica de neopreno que se comprime con el apriete, y permite asegurar un buen contacto entre el portamuestras y la superficie de la sala de ensayos. Como sistema complementario, en cada cambio de muestra, se coloca una banda de sellado complementaria. En las imágenes de la Figura 1.30 se puede observar la colocación de dicha banda sobre la superficie de neopreno, y un detalle del sistema de amarre del portaprobetas con la estructura de la celda.

1.3.2 Construcción de las muestras

La construcción de la probeta de ensayo es un punto delicado, ya que las características de la misma deben reproducir las de la solución de fachada que se desea analizar. El proceso de fabricación y montaje está definido mediante un procedimiento interno de calidad, en el que se indican los pasos a seguir y la documentación necesaria a registrar. Ésta es una exigencia de la red *PASLINK*, que tiene como objetivo la posibilidad de análisis de todo el proceso de ensayo por agentes externos, tras la ejecución del mismo.

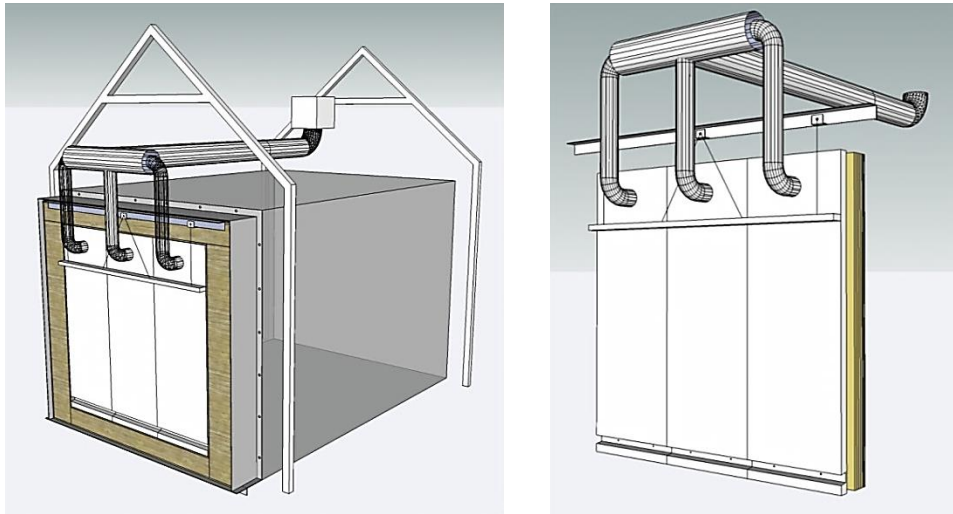


Figura 1.31 – Diseño del prototipo de ensayo de una fachada ventilada forzada

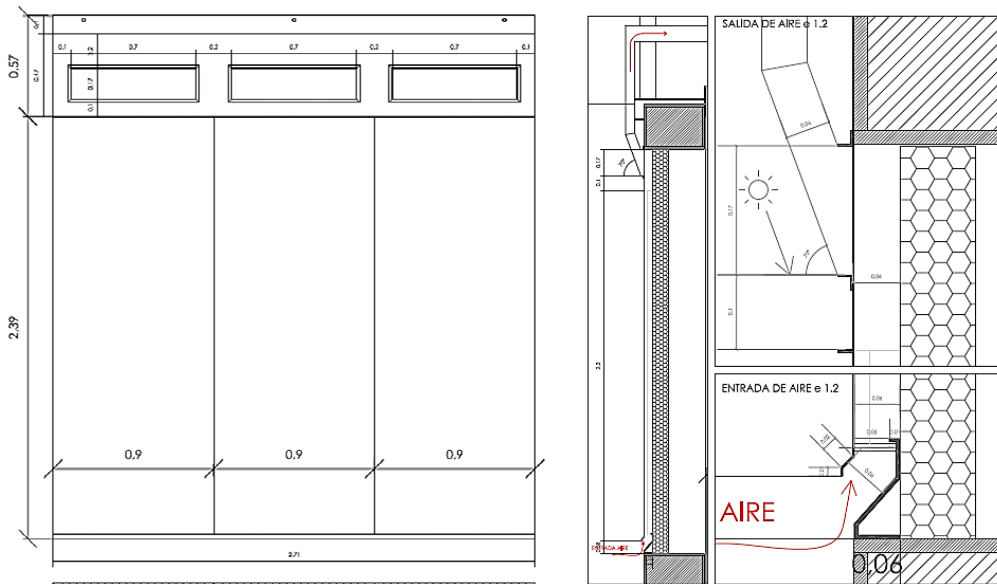


Figura 1.32 - Planos constructivos del prototipo de ensayo de una fachada ventilada forzada

El primer paso consiste en la definición geométrica de la muestra y el diseño del sistema de anclaje en el portaprobetas. Todos los detalles constructivos se registran mediante planos en los que quedan completamente definidas todas las características de la muestra, y son revisados previa aceptación. Como ejemplo del proceso, se

muestra la ejecución de la probeta correspondiente a una fachada ventilada forzada, que pertenece al grupo de ensayos estudiados en la presente tesis. En dicha fachada se busca plantear un sistema de ventilación forzada que pueda ser controlado y conectado al sistema de climatización del edificio. Para poder reproducir este sistema se diseña un conjunto de conductos captadores de aire que se conectan a una soplante controlada. En las imágenes de la Figura 1.31 se muestra el diseño planteado para este estudio. Una vez definido el prototipo, se llevan a cabo los planos constructivos de la muestra, junto con los detalle de anclaje a la celda, ver Figura 1.32.



Figura 1.33 – Construcción y colocación de la instrumentación en la muestra



Figura 1.34 – Colocación del portamuestras en la celda de ensayos EGUZKI

Tras la definición, se pasa a la construcción de la muestra, la cual se realiza por técnicos especializados, en el interior del pabellón de montaje del LCCE. Los trabajos se realizan con el portaprobetas colocado sobre una bancada de trabajo, de forma que se puedan realizar las diferentes etapas constructivas con precisión y control, y total seguridad para los técnicos, ver Figura 1.33. Finalizada la construcción en el interior del pabellón, el portamuestras se instala en la celda de ensayos, para lo cual se emplea una grúa. La

colocación de la muestra es un proceso relativamente sencillo, ver Figura 1.34, y tras su adecuada ubicación en la bancada se pasa a atornillar los pernos de sujeción. Con el portaprobetas adecuadamente fijado se realizan los trabajos finales sobre la probeta, como en este caso, la colocación de las tolvas de aspiración para el sistema de ventilación forzada, ver Figura 1.35, y el sellado de todas las juntas perimetrales para reducir las infiltraciones. El adecuado sellado de las mismas se verifica mediante el ensayo de presión. Finalmente, los planos constructivos se adaptan con las posibles modificaciones realizadas durante el proceso de construcción, así como la instalación final de la instrumentación.



Figura 1.35 – Trabajos finales sobre la probeta instalada en la celda

1.3.3 Instrumentación específica de las muestras

El objetivo con el que se define la instrumentación con la que se equipa la muestra es el de caracterizar:

- las propiedades térmicas de las hojas que conforman la fachada;
- el comportamiento del aire dentro de la cámara ventilada.

Para la medida de los dos aspectos definidos, se registran las siguientes variables:

- temperatura de superficies
- flujo de calor superficial
- temperatura de aire
- diferencia de temperatura del aire
- velocidad de aire
- pérdidas de carga
- caudal de aire

En la Tabla 1.10 se muestran las características técnicas de los instrumentos de medida empleados en los ensayos. Para la medida de las propiedades térmicas de las hojas que conforman cada uno de los prototipos de fachada se registra la temperatura superficial. Para determinar este parámetro se mide el gradiente de temperatura en el eje vertical y en el eje horizontal, de forma que se pueda verificar que la distorsión del campo de temperaturas en cada plano de la fachada no afecte al comportamiento térmico de la misma. En el análisis y modelado, se trabaja con el valor promedio como

temperatura de la capa. Las sondas de temperatura empleadas son termoresistencias Pt100 de superficie, salvo en las capas en las que por el proceso de construcción, como en capas interiores recibidas con mortero o yeso, exigen mayor robustez de las sondas, empleándose en su caso termopares tipo T.

Parámetro	Unidades	Tipo de sensor	Incertidumbre
Temperatura	°C	PT100, clase A, conexión 4 hilos	± 0,2 °C
Temperatura	°C	Termopar tipo T	± 0,4 °C
Termopila	°C	Termopar tipo K	± 0,01 °C
Flujo de calor	W/m ²	Ahlborn FQA-0801-H	± 5 %
Termoanemómetro	m/s	Ahlborn FVA-605-TA-1	± 0,01 m/s
Presión diferencial	bar	Ahlborn FD8612DPS/APS	± 0,5 mbar
Caudal de aire	m ³ /h	Kímo CP300-ALETAS DEBIMO	± 3 %

Tabla 1.10 – Características de la instrumentación de las muestras



Figura 1.36 – Medida de la temperatura superficial y flujo de calor en las probetas

En las sondas de temperatura que estén expuestas a radiación, como es el caso de las sondas que miden la temperatura superficial exterior, el sensor se recubre de una lámina de baja emisividad para reducir dicho efecto sobre el valor medido. Junto con la temperatura, se registra el flujo unidimensional en el punto central de la superficie, mediante fluxímetros. Esta medida se emplea principalmente como variable de contraste en la verificación de los modelos. En la Figura 1.36 se puede observar un esquema de colocación de las sondas de temperatura superficial en las capas de la muestra y varias imágenes de la instalación de las mismas junto a la colocación de los fluxímetros. La medida de las condiciones de la cámara de aire ventilada es el apartado más complejo en el proceso de ensayo, y que, por tanto, mayor instrumentación implica para su adecuada caracterización. En este caso, es necesario llegar a un compromiso entre el número de sensores a colocar sin afectar el propio movimiento de aire, así como la complejidad de la medida en cámaras de aire de espesor reducido. Teniendo en cuenta este criterio, y que las dimensiones de la probeta permite desprestigiar los efectos de los bordes laterales de la muestra, el comportamiento térmico de la cámara de aire se evalúa en 2D, tomando como referencia el plano correspondiente al eje vertical central. Para lo cual se registra la temperatura y velocidad de aire en cuatro puntos, correspondientes a la entrada, a 30 [cm] de altura, en el punto central, y la salida. De esta forma se caracteriza la turbulencia de entrada y el desarrollo de la vena fluida.

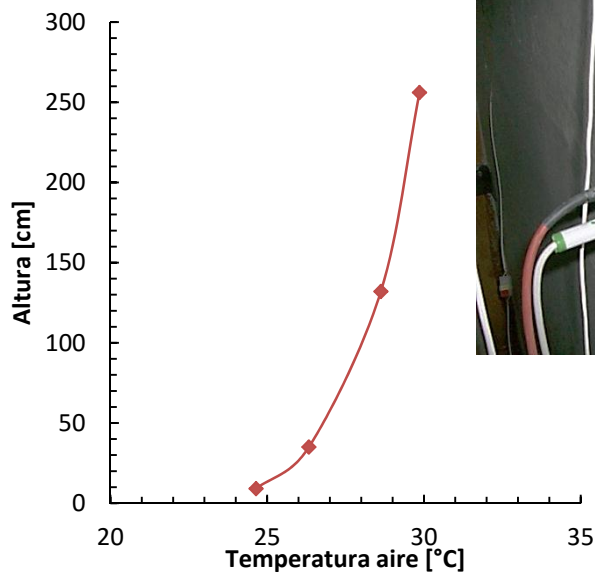


Figura 1.37 – Medida del perfil de temperaturas de aire en la cámara ventilada

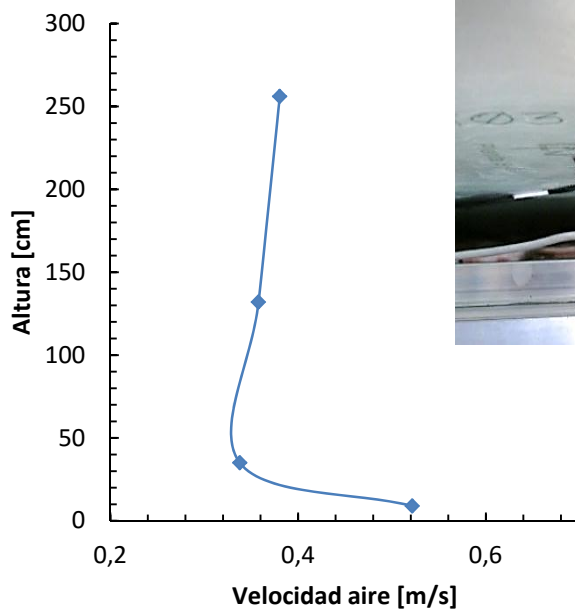


Figura 1.38 – Medida del perfil de velocidades de aire en la cámara ventilada

En la Figura 1.37 y Figura 1.38 se muestra un ejemplo, correspondiente a datos experimentales, de los perfiles de temperatura y velocidad de aire a lo largo de la sección central, junto con imágenes de la instrumentación. Para completar la información registrada, para cada punto medido en aire, se colocan sendos sensores de temperatura en las superficies que conforman la cámara ventilada, ver Figura 1.38. Para verificar la hipótesis de bidimensionalidad se miden los perfiles de temperatura horizontales del aire en el plano de entrada, en el plano central y en el plano de salida. Como tercer parámetro de caracterización del movimiento de aire, se registran las pérdidas de carga tanto para el punto de entrada, determinante en el comportamiento

de la fachada ventilada, como las pérdidas de carga entre la entrada y la salida. Esta medida se realiza mediante sensores de presión diferencial, los cuales se conectan usando dos configuraciones: empleando tubos de *pitot*, para medidas de presión puntuales; o mediante tubos de presión interconectados, que registran la presión media en el plano de entrada y en el plano de salida, mediante tres orificios de medida, uno central y dos extremos. En la Figura 1.39 se muestran imágenes de ambas configuraciones de medida.



Figura 1.39 – Medida de la pérdida de carga en la cámara ventilada



Figura 1.40 – Nomenclatura e instalación de las sondas

La instrumentación de la muestra se codifica con la misma nomenclatura que la indicada en los procedimientos de la red *PASLINK*, y se instala según los planos recogidos en los documentos de ensayo. En la imagen de la Figura 1.40 se puede apreciar el proceso de colocación de las sondas de aire y medida de presión en una muestra. Para la medida de la ganancia de calor total que se produce en la cámara ventilada se instala una termopila formada por diez puntos de medida, y configurada mediante cable de termopar tipo K. La termopila se fabrica en las instalaciones del propio laboratorio y se calibra mediante dos baños de inmersión y sendas sondas de referencia de temperatura. Esta forma de medida permite registrar directamente la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del aire, con una elevada precisión. La termopila se instala colocando cinco puntas en cada uno de los planos de medida, correspondientes a la entrada y salida de aire de la cámara ventilada. En la Figura 1.41 se muestra la curva de calibración de la termopila.

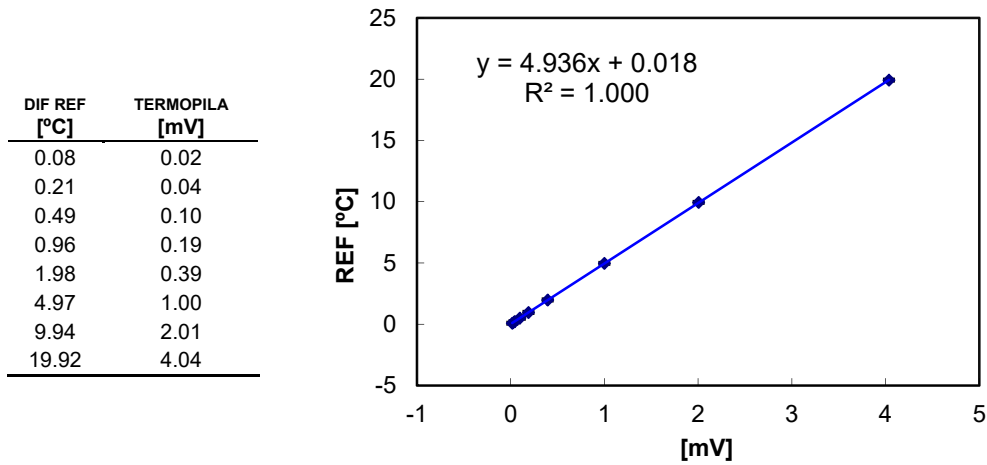


Figura 1.41 – Termopila de medida del calentamiento del aire en la cámara ventilada

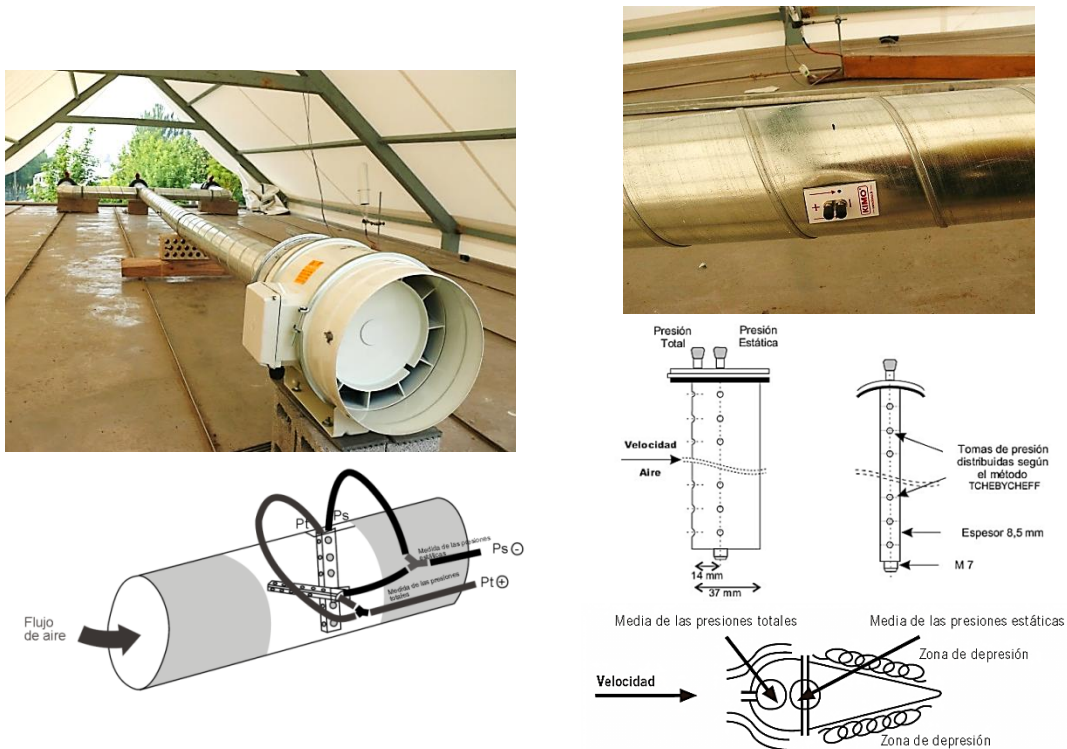


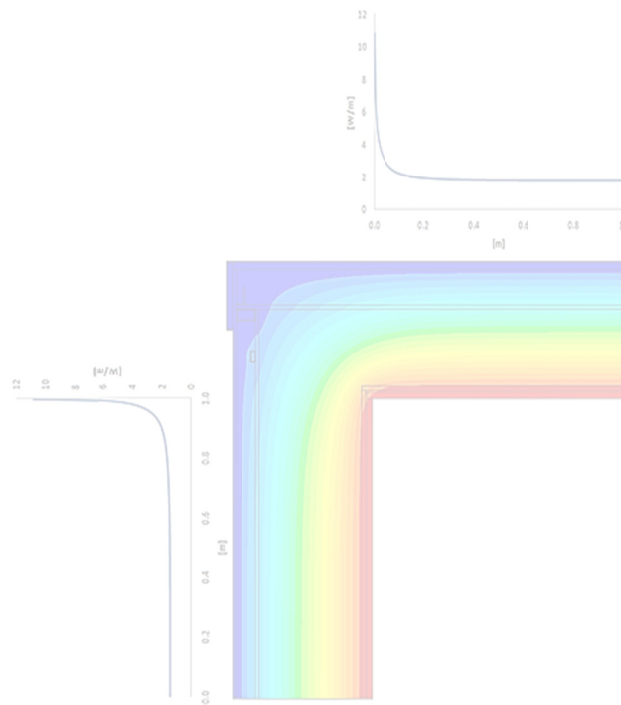
Figura 1.42 – Sistema de aspiración y medidor de caudal para fachadas forzadas

Para poder caracterizar cámaras de aire con movimiento forzado, la celda *EGUZKI* dispone de un sistema de tres conductos de aspiración instalados sobre la cubierta, que se comunican con una soplante de aspiración mediante un conducto final único. Cada uno de los conductos de aspiración dispone de una válvula de regulación que permite equilibrar el caudal circulante en la cámara de aire, de forma que la componente vertical de la velocidad presente un patrón homogéneo en toda la sección horizontal, eliminando los efectos de borde de la muestra, en su contacto con el premarco aislante. En el punto central del conducto de aspiración único, está instalado un caudalímetro que mide flujo volumétrico de aire, que junto con una sonda de temperatura, permite determinar el caudal normal que circula durante el ensayo. El mecanismo de medida del caudalímetro se basa en la medida diferencial entre la

presión dinámica y estática, y está configurado de forma que determina el efecto de pared del conducto. En las imágenes de la Figura 1.42 se muestra la instalación de aspiración y el sistema de medida de caudal. Para obtener diferentes caudales de ensayo, la soplante está regulada mediante un variador de potencia, que se a su vez, se puede controlar con el sistema de adquisición de la celda, de forma que se pueden realizar ensayos complejos que integren caudal variable con las condiciones térmicas de la fachada y del ambiente.

Capítulo 2

Calibración del equipo





2.1 Metodología de calibración

El primer paso necesario en el procedimiento *PASLINK* es la calibración de la celda. Para ello se emplea una muestra específica, denominada muro de calibración, de similares propiedades térmicas a la envolvente de la celda. El ensayo de calibración permite determinar el factor final de corrección de la medida del flujo de calor de la envolvente de la celda. Este factor de calibración tiene en cuenta los efectos del montaje final de las *tilas*, efectos como la medida de los puentes térmicos y la superficie no cubierta por los sensores. También permite separar el flujo de calor que se intercambia a través de la envolvente y el flujo que intercambia el propio muro de calibración. Este proceso de estudio permite determinar las propiedades térmicas reales de la envolvente de la sala de ensayo, y definir el modelo térmico de la misma, que se empleará para el resto de ensayos de caracterización de las muestras.



Figura 2.1 – Fabricación e instalación del muro de calibración



Figura 2.2 – Sala de ensayo con el muro de calibración instalado

Un punto muy importante, tanto en el proceso de calibración como en la ejecución de los estudios, es la definición de la rutina de ensayo. El procedimiento de ensayo afecta en gran medida a los resultados del mismo. La red *PASLINK* ha desarrollado un procedimiento estándar que permite maximizar el potencial de los métodos de identificación de parámetros aplicados a la caracterización en régimen dinámico. Este

procedimiento permite acortar los periodos de ensayo y obtener modelos de los componentes de amplio espectro de aplicación. En el presente capítulo se describen las características del muro de calibración, junto con la definición precisa de la metodología de ensayo. Posteriormente se muestran los resultados experimentales de cada una de las rutinas de ensayo planteadas, así como la determinación de los factores de calibración de las *tiles*. Finalmente se define el modelo matemático de la celda de ensayo junto con una introducción a los métodos de identificación de parámetros. El proceso de calibración consiste en inyectar una señal de potencia en la sala de ensayos, medida con un vatímetro y compararla con la energía transmitida a través de la envolvente, medida por las *tiles*. Para maximizar la precisión del ensayo de calibración, se instala en la zona de la muestra un muro opaco con la misma transmitancia que la envolvente de la celda, de forma que el flujo en cada superficie se reparta lo más homogéneamente posible. El muro de calibración se configura mediante un núcleo de poliestireno expandido de 40 [cm] de espesor recubierto de planchas de madera laminada. En la Figura 2.1 se puede observar el proceso de fabricación de la envolvente exterior y la colocación de las planchas de aislante. La superficie final se remata con pintura plástica blanca. Sobre la cara interior del muro de calibración se colocan *tiles*, de igual forma que en el resto de paredes de la sala de ensayos. En el apartado 2.2.1 se puede ver la configuración de medida de los grupos de *tiles* instalados en el muro de calibración. En la Figura 2.2 se observa el estado final de la superficie interior de la sala de ensayos con el muro de calibración.

Queda por seleccionar la rutina de ensayo a realizar, la cual es fundamental para poder obtener buenos resultados. La duración del periodo de ensayo, y la forma de la señal de potencia son unos de los principales parámetros a definir. En el siguiente apartado se recogen las características de las rutinas de ensayo desarrolladas en los procedimientos de la red *PASLINK*.

2.1.1 Rutina de ensayo

Los procedimientos de ensayo han ido evolucionando simultáneamente a las mejoras y cambios de metodologías de uso de la propia celda, y de la experiencia ganada en los diferentes proyectos y ensayos. Este periodo de desarrollo ha permitido obtener un procedimiento de alta calidad y muy ajustado a las propiedades de la celda. Los principales aspectos que definen las características de la rutina de ensayo son:

- Señal dinámica que permita desacoplar las componentes de excitación del sistema.
- Máxima diferencia de temperatura entre las superficies interior y exterior de la muestra para mejorar la precisión de medida y cálculo de la transmitancia.
- Diferentes niveles de temperatura para determinar la variabilidad de resultados.
- Alta capacidad de validación de resultados, gracias a la riqueza de información contenida en los datos medidos.
- Minimizar la duración del periodo de ensayo.

Una problemática de los ensayos en condiciones exteriores es la correlación que existe entre la diferencia de temperatura interna-externa y la componente de radiación solar. Este acoplamiento hace complejo la determinación precisa de la transferencia de calor asociadas a la diferencia de temperatura, de las ganancias solares asociadas a la incidencia solar. La intercorrelación entre excitaciones se puede minimizar aumentando la variabilidad de las condiciones de ensayo. Para el caso de las pérdidas de calor y de las ganancias solares, la mejor forma, es generando la máxima variación

de la temperatura de la sala de ensayo, y que dicha variabilidad, se obtenga mediante una rutina que sea independiente del periodo de radiación solar.

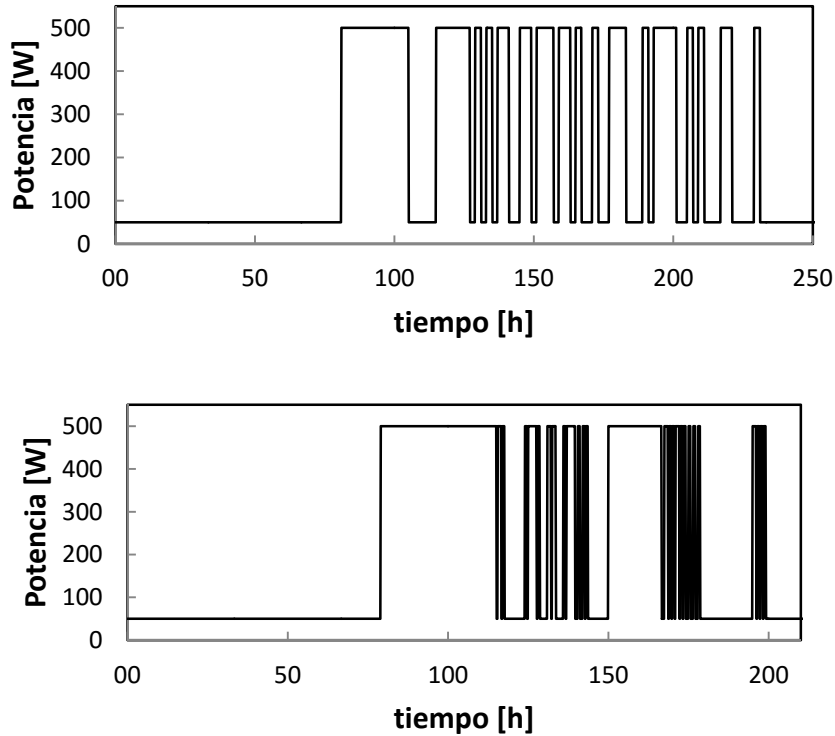


Figura 2.3 – Rutina PRBS, gráfica superior, y rutina ROLBS, gráfica inferior

Para la realización de los ensayos se emplea dos tipos de rutinas denominadas PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) y ROLBS (*Randomly Ordered Logarithmically distributed Binary Sequence*). Estas rutinas están formadas por secuencias de conexión y desconexión de la resistencia calefactora, con frecuencias ajustadas al tiempo de respuesta de la estructura de la celda. La frecuencia de excitación y la duración de la rutina deben permitir desacoplar la respuesta de la envolvente de la celda de la respuesta de la muestra. En la Figura 2.3 se muestran las rutinas de ensayo PRBS y ROLBS, y se definen en el Anexo A. El proceso de ensayo comienza, en ambos casos, con un periodo de inicialización, en el que la temperatura de ensayo evoluciona de forma libre, y posteriormente arranca el proceso de excitación. En el caso de la rutina PRBS, el intervalo base es de 2 [h], y en el caso de la rutina ROLBS es de 0,5 [h].

$$P_e = (UA_{pr} + UA_{se}) \cdot (T_{se} - T_e) - gA \cdot G_v \quad [2.1]$$

La señal de excitación oscila entre la potencia base del ventilador, que funciona en todo momento, para homogeneizar la temperatura de la sala de ensayos, y la potencia total, cuando entra la resistencia calefactora. Dicha potencia se debe ajustar de forma que la diferencia de temperatura media de ensayo sea superior a 10K, siendo aconsejable trabajar con diferencias próximas a los 20K, para mejorar la precisión de medida de los flujos de calor. La potencia de ensayo se estima mediante la ecuación [2.1], donde: UA_{pr} y UA_{se} son las transmitancias totales de la probeta a ensayar y de la sala de ensayos; T_{se} y T_e las temperaturas de la sala de ensayos y la temperatura media del ambiente exterior; y gA_{pr} corresponde a la ganancia solar total de la muestra,

que se multiplica por la componente media de la radiación que incide sobre la superficie vertical de la muestra, G_v . Para las condiciones ambientales de Vitoria-Gasteiz y las propiedades térmicas de la celda *EGUZKI*, la potencia necesaria para obtener unas diferencias de temperatura de 20K oscila entre los 250 [W] y 500 [W]. Por criterios de seguridad y durabilidad de los componentes de la celda, la temperatura de la sala de ensayos no debe superar los 45°C, este requisito es el que limita la diferencia máxima de temperaturas de ensayo.

2.1.2 Medida del flujo de la envolvente

El ensayo de calibración tiene como objetivo la determinación precisa del flujo de calor que intercambia la envolvente de la sala de ensayos. Para ello, se compara el flujo medido por las *tilas* con la energía eléctrica introducida durante el periodo de ensayo, ver ecuación [2.2]. Este cálculo se verifica para las rutinas *ROLBS*, *PRBS* y una excitación pulso. Si la medida de las *tilas* es correcta, y se han cuantificado de forma adecuada los efectos de borde, el factor de calibración total de la celda debe estar comprendido entre $1 < f_{c,t} < 1,2$. Éste factor tiene que ser superior a la unidad ya que la superficie cubierta por las *tilas* es 2,5% menor que la total, como se ha comentado en el apartado 1.2.1. Por otro lado no se tienen en cuenta las infiltraciones de aire, que aunque su efecto es prácticamente despreciable debido a la estanqueidad de la celda, existirá un caudal mínimo que se computa dentro del factor de calibración. Como estos dos aspectos, y otros posibles no tenidos en cuenta, se han configurado de forma que representen un efecto pequeño, el valor del factor $f_{c,t}$ no puede ser muy elevado, considerándose aceptable cuando se encuentra por debajo del 1,2.

$$f_{c,t} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} P_e(t) dt}{\int_{t_i}^{t_f} Q_{hfs,t}(t) dt} \quad [2.2]$$

El flujo total medido por las *tilas* se determina mediante la suma de los flujos registrados por cada uno de los grupos, ecuación [2.3]. Primero se obtiene el flujo total sumando los 21 grupos, y posteriormente se calcula sumando por separado los 16 grupos instalados en la envolvente y los 5 grupos del muro de calibración. Este segundo cálculo se realiza para evaluar el efecto de la medida del flujo en la zona de probeta frente a la medida del flujo en la envolvente. Las condiciones de ambas zonas son diferentes, ya que la envolvente está protegida por el toldo exterior que le atenúa el efecto de la radiación solar y la convección debida a la velocidad de viento, mientras la muestra, en este caso el muro de calibración, está sometido a dichas condiciones ambientales. En el apartado 3.4.2 se puede ver el resultado de este análisis. El flujo medido por cada grupo, teniendo en cuenta que las *tilas* que lo componen están conectadas en serie, y por tanto, la señal registrada corresponde a la suma de las mismas, se determina mediante la ecuación [2.4],

$$Q_{hfs,t} = \sum_{i=1}^{21} Q_{hfs,g}(g_i) \quad [2.3]$$

$$Q_{hfs,g}(g_i) = \frac{F_c(g_i) \cdot V(g_i) \cdot A(g_i)}{N(g_i) \cdot \epsilon(g_i)} \quad [2.4]$$

donde:

- F_c : factor de corrección del grupo por efectos de borde, ($F_c = 1$, para los grupos centrales),
- V : señal de tensión generada por el grupo, (V_{DC}),
- A : área asignada al grupo, (incluidos los espacios entre *tiles*),
- N : número de *tiles* del grupo,
- ϵ : coeficiente de calibración de las *tiles*.

El coeficiente de sensibilidad de las *tiles* se obtiene de la calibración de 25 sensores, a una temperatura de referencia de 20°C, siendo $\epsilon_{ref} = 31,5 \pm 1.7$ [$\mu V/(W/m^2)$], tomándose el valor promedio como el factor de calibración para el total de sensores. La dependencia respecto a la temperatura del coeficiente de sensibilidad es de 0.14 [%/K], de forma que para transformar la señal eléctrica en flujo de calor se aplica la ecuación [2.5]. El factor ϵ_{ref} se calibra con una periodicidad de 2 años.

$$\epsilon = [1 - (0,0014 \cdot (T - T_{ref}))] \cdot \epsilon_{ref} \quad [2.5]$$

Para cuantificar adecuadamente el flujo en las zonas de borde se aplica un factor de corrección, F_c . Este factor varía en función de las tipologías de puente térmico de la envolvente de la sala de ensayos. Para determinar dichos factores, se emplean las *multitiles*. Hay instalada una *multitile* en cada grupo representativo de las diferentes tipologías de borde. Las *multitiles* disponen de tres sensores situados a 30, 120 y 430 [mm] del borde, sensores A, B y C respectivamente, ver imágenes en apartado 1.2.1. El sensor C, el más alejado del borde, registra el flujo unidimensional, el sensor A registra el flujo mayor, y el sensor B un valor intermedio, y es el que participa en el grupo en el que se encuentra la *multitile*. Esta configuración de sensores permite ajustar la curva de flujo mediante aproximación lineal. En el documento *Procedimiento de Medida*^[66] se recoge esta metodología de determinación del F_c , para los valores estándar de la configuración de la celda *PASLINK*. Para ajustar el cálculo, se ha realizado un estudio mediante volúmenes finitos de los efectos de borde de la celda *EGUZKI*. Como herramienta de cálculo se ha empleado el software *Fluent 6.2*[®].

Malla	Elementos	130445	Cálculo	ΔT	20	K	Resultados	q	3.64	W/m	
	Tamaño	3 mm		U_{pared}	0.070	W/m ² K		L^{2D}	0.182	W/mK	
	EquiAngleSkew	0 - 0.1		99.61%	U_{techo}	0.088		W/m ² K	Ψ	0.024	W/mK
	Aspect Ratio	1 - 1.1		98.07%	l_{pared}	1		m			
				l_{techo}	1	m					

Tabla 2.1 – Parámetros del modelo de puente térmico para analizar el efecto de borde en el encuentro entre cubierta y pared lateral

En la Tabla 2.1 se recogen las características del modelo que representa el efecto de borde de la *tipología 1*, correspondiente al encuentro entre cubierta y pared lateral. En la Figura 2.4 se muestran los perfiles de temperatura, y se representa la variación del flujo en la proximidad del efecto de borde. La forma más extendida de cuantificar los efectos de borde es aplicando el concepto de transmisión lineal. Este método se basa en corregir el flujo unidimensional aplicado a toda la superficie, como si no hubiese efecto de borde, con un término asociado a la longitud del borde que se obtiene de un cálculo estático y se define como transmitancia térmica lineal. El procedimiento de cálculo está definido en la norma *ISO 10211*^[15], y corresponde a la ecuación [2.6]. Donde el L^{2D} es el flujo total que atraviesa la superficie interior por unidad de longitud dividido

por el salto de temperaturas aplicado. Este valor se obtiene del resultado del modelo numérico. El valor estimado para la transmitancia lineal del efecto de borde en la *tipología 1* es de $\Psi = 0.024$ [W/mK].

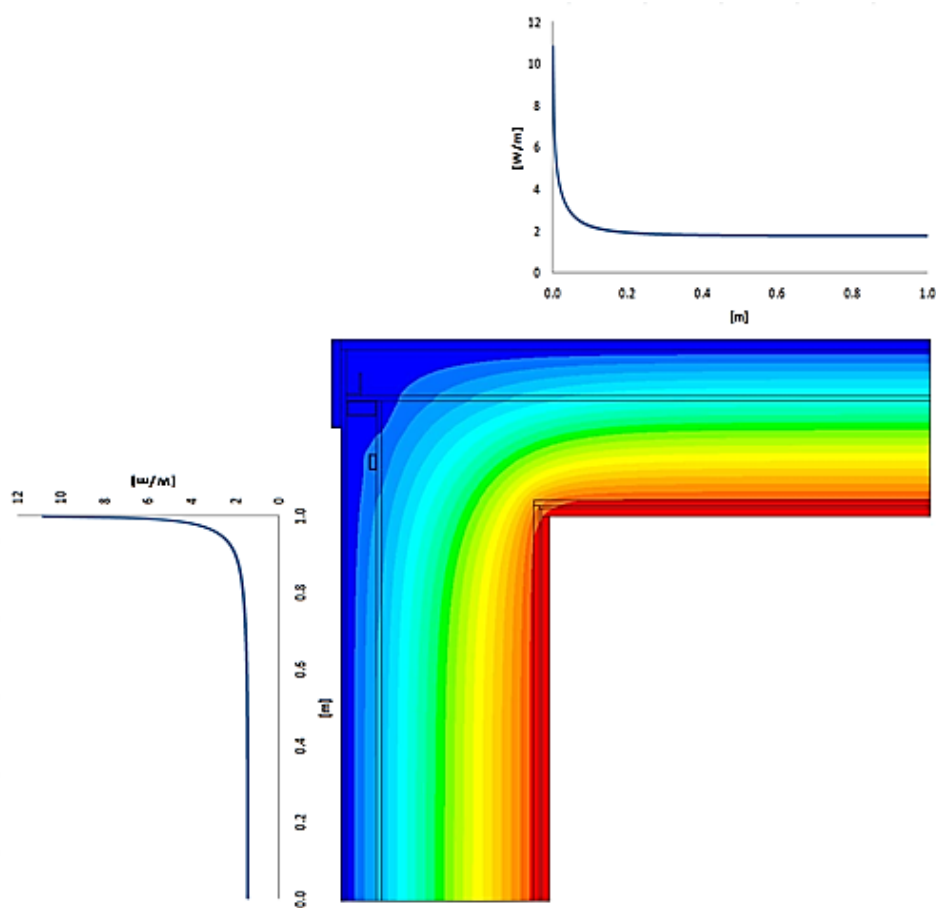


Figura 2.4 – Perfil de temperaturas en la sección del encuentro entre cubierta y pared lateral, y flujos en las superficies interiores

El coeficiente de transmitancia lineal permite realizar una estimación del efecto de borde, y es útil para aproximar la potencia de ensayo necesaria. Pero su cálculo se realiza en condiciones estacionarias y puede presentar un elevado error en la determinación del flujo en la zona de borde en condiciones dinámicas^[12]. El flujo real intercambiado sólo se puede determinar con precisión a través del perfil que se genera en las proximidades del efecto de borde. El interés de las *multitiles* es el de poder medir dicho perfil de flujo durante el ensayo.

$$\Psi = L^{2D} - \sum_i U_i \cdot l_i \quad [2.6]$$

$$F_c = \frac{\int_0^L q(x) \cdot dx / L}{qB} \quad [2.7]$$

El sensor B, que es el sensor que realiza la medida del flujo en todo el grupo de borde, está posicionado de forma que mide un valor próximo al valor integrado del flujo total. Aun así, esta medida se corrige para obtener el valor exacto. Para medir con precisión

dicho efecto se aplica el factor de corrección, F_c , según la ecuación [2.7]. Para ello, la integral de la función $q(x)$ se calcula mediante una aproximación lineal, empleando las lecturas de los tres sensores de la *multitile*. En la Figura 2.5 se muestra la curva de flujo obtenida con el modelo de volúmenes finitos, curva de color azul, y la aproximación lineal que se emplearía en el proceso de ensayo. El área debajo de la aproximación lineal se obtiene fácilmente mediante integración, ecuación [2.8], teniendo en cuenta que la *tile* se coloca a 5mm del borde y le corresponde la mitad del hueco de separación con la siguiente *tile*. El error de la aproximación es inferior al 5% en el cálculo del flujo total intercambiado.

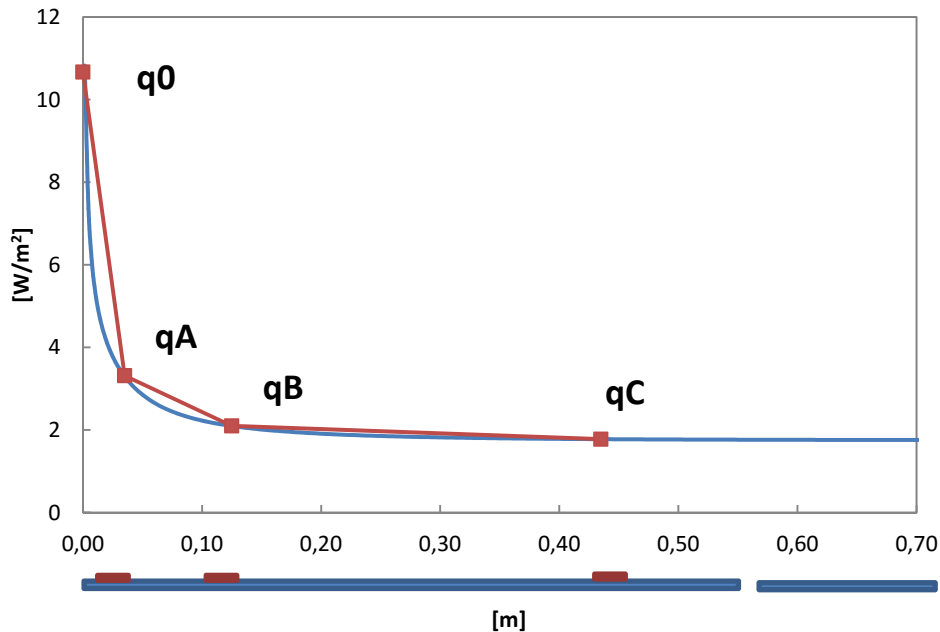


Figura 2.5 – Aproximación lineal del flujo de borde en el encuentro entre cubierta y paredes, correspondiente a la *tipología 1*

$$\frac{\int_0^L q(x) \cdot dx}{L} = \frac{35q_0 + 125q_A + 300q_B + 310q_C}{2 \cdot (5 + 530 + 5)} \quad [2.8]$$

Los valores de flujo q_A , q_B y q_C , se miden directamente, y queda por determinar el valor del flujo en el borde, q_0 . Este valor es dependiente de la geometría del efecto de borde, y de las condiciones dinámicas de temperatura. El efecto de la geometría se tiene caracterizado mediante el perfil obtenido en el modelo numérico, y el efecto del régimen dinámico se tiene en cuenta relacionando la pendiente entre el punto q_0 y q_A , con la pendiente entre los puntos q_A y q_B , en cada instante. Para la *tipología 1* se obtiene una relación de pendientes de $\kappa_{0A} = 7,41 \cdot \kappa_{AB}$. Para verificar la validez de la hipótesis de cálculo planteada, se realiza un estudio, en régimen dinámico del modelo numérico. En la Figura 2.6 se muestran las excitaciones de temperatura interior y exterior que se han aplicado en el estudio, y que corresponden a datos medidos durante el ensayo de calibración. En la Figura 2.7 se muestran los flujos de calor que se producen en la zona alejada de los efectos de borde, para la cubierta y la pared lateral. Se puede observar que las características térmicas de la configuración de la cubierta y las paredes laterales no difieren en gran medida, generando flujos muy similares. Esto permite caracterizar el efecto de borde mediante los mismos parámetros. Para analizar la validez de la hipótesis de determinación de los efectos de borde, se han tomado diferentes instantes de tiempo, y se ha comparado el perfil de flujos de calor a lo largo

de la zona donde se produce el efecto de borde. Sobre los perfiles se superponen los datos que se obtendrían aplicando la metodología de medida de las *multitiles*, representados mediante puntos, ver Figura 2.8.

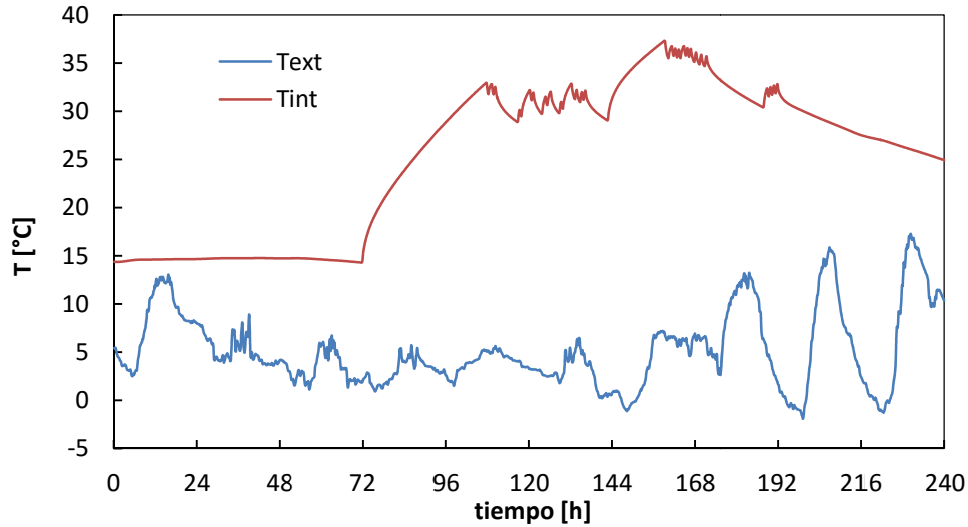


Figura 2.6 – Excitaciones de temperatura aplicadas al modelo numérico de efecto de borde de la *tipología 1*

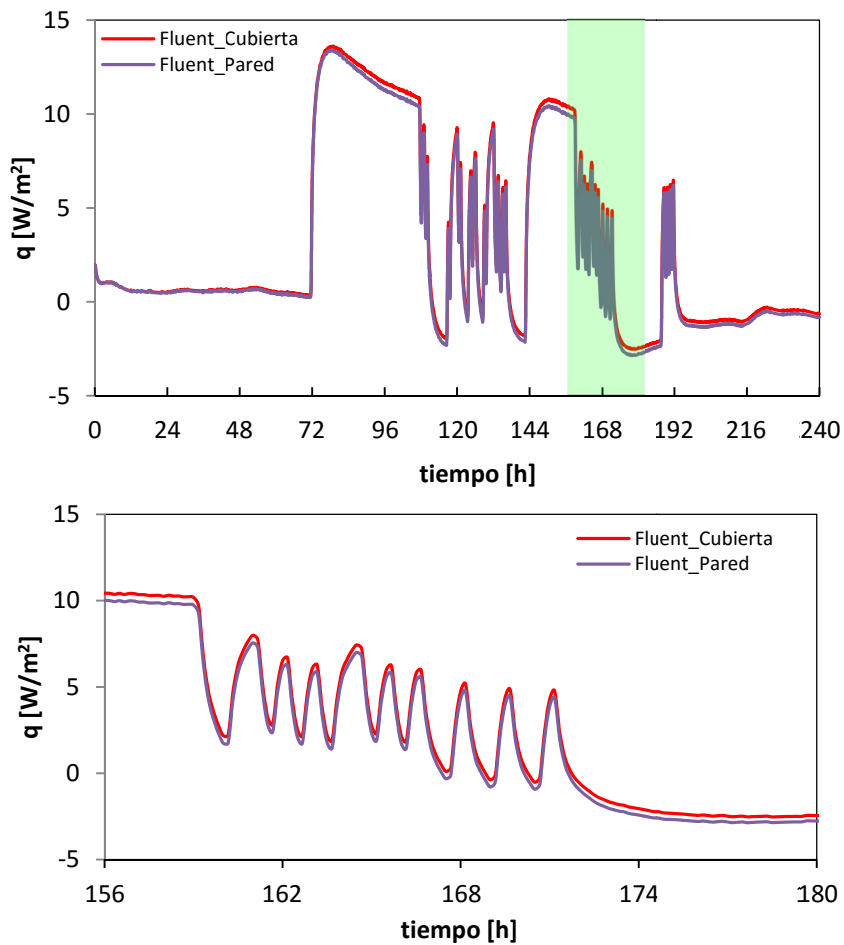


Figura 2.7 – Flujos unidimensionales obtenidos mediante el modelo numérico en la zona de borde de la *tipología 1*

Se comprueba cómo la hipótesis de trabajo es válida para la determinación de los efectos de borde en condiciones dinámicas. El error estimado en la aplicación de la metodología es del 1,2%, respecto al flujo determinado mediante integración exacta. Este proceso de cálculo se repite para los efectos de borde de las *tipologías 2 y 3*, que corresponden a los grupos de la zona sur. En el caso de la *tipología 4*, correspondiente a la pared de separación con la sala de servicio, el factor de corrección se toma como la unidad, $F_c = 1$, ya que es una zona en la que se considera que la medida del sensor B es suficientemente aproximada. Este criterio se toma ya que la pared norte está sometida a un menor gradiente de temperatura, pues la sala de servicio está a mayor temperatura que el ambiente exterior.

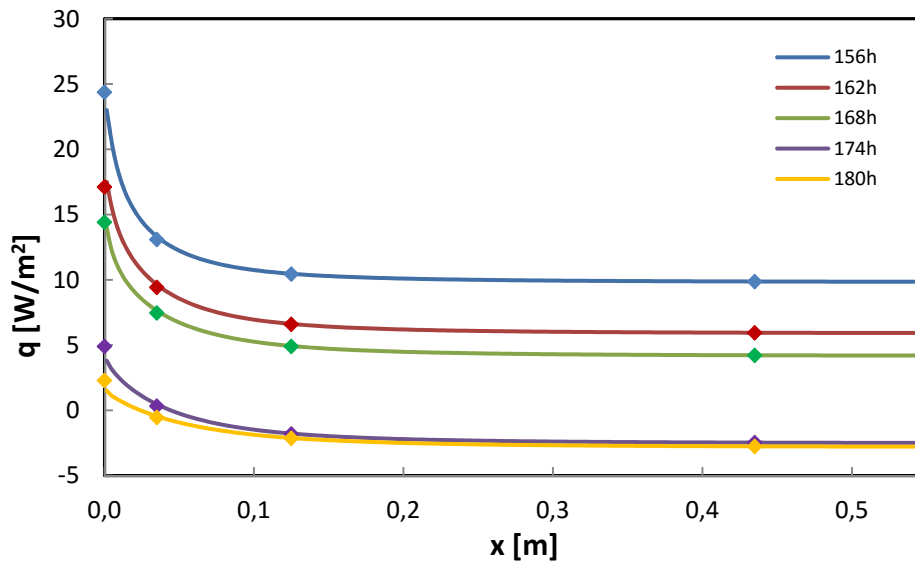


Figura 2.8 – Validación de la metodología de determinación de los efectos de borde mediante las *multitiles* en la *tipología 1*

En la Figura 2.9 se muestran los perfiles de temperatura y las curvas de flujo en la superficie interior para la zona de unión entre la pared este y el suelo, con el premarco aislante del portamuestras, respectivamente. Se observa cómo el flujo de calor es mayor en la zona de suelo, ya que el aislante del premarco presenta mayor conductividad, fibra de vidrio frente a EPS, y menor espesor. También se aprecia en los perfiles de flujo, para la zona de la envolvente de la sala de ensayos, el efecto de la madera instalada como remate para protección del aislante. Se puede ver cómo el flujo aumenta a una mayor distancia del efecto de borde, y presenta una forma no tan apuntada como en los perfiles analizados previamente. En la Tabla 2.2 se recogen los coeficientes que relacionan la pendiente entre los flujos medidos por los sensores de las *multitiles* y la pendiente en el eje correspondiente al efecto de borde, empleados para el ajuste lineal de los perfiles de flujo, en las diferentes tipologías.

	tip. 1	tip. 2	tip. 3
K_{0A}/K_{AB}	7,41	5,01	4,92

Tabla 2.2 – Coeficientes de la aproximación lineal del efecto de borde

Se puede observar que el efecto de borde de la *tipología 3* presenta la menor relación entre pendientes del flujo. Esto indica que el efecto de borde tiene mayor efecto sobre

el flujo. Una vez definida la metodología de medida del flujo a través de la envolvente de la celda teniendo en cuenta los efectos de borde bidimensionales, los efectos tridimensionales se consideran despreciables. De todos modos mediante el ensayo de calibración se obtienen los factores de corrección reales, a través de los resultados experimentales.

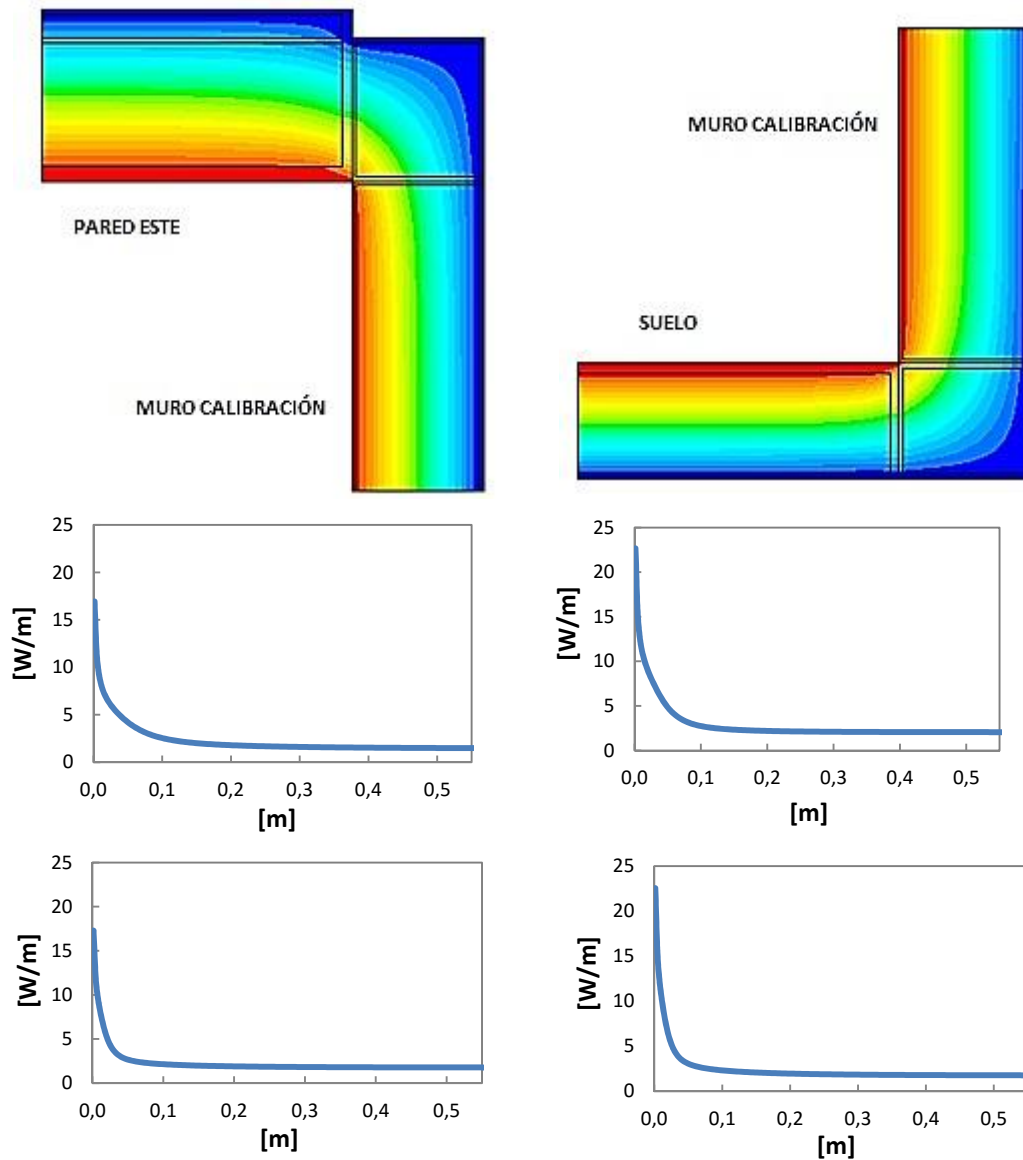


Figura 2.9 – Modelos de estudio del efecto de borde para las *tipologías* 2 y 3. De arriba abajo, se muestra el perfil de temperatura y las curvas de flujo superficial interior en la sala de ensayos y del muro de calibración

2.1.3 Correcciones para el muro de calibración

En los ensayos de caracterización de muestras es necesario tener en cuenta los efectos de borde que se producen en la zona de unión de la probeta con el premarco aislante. Como se indica en el *apartado* 1.3.1, esta situación se tiene en cuenta en el momento de diseñar el sistema de portamuestras, buscando la opción que minimice dichos efectos.

Pero es necesario cuantificarlos y verificar que el flujo de borde no está afectando a la determinación de las propiedades térmicas de la muestra. En la imagen de la Figura 2.10 se muestra un esquema de los flujos que se producen en la zona de unión del portamuestras con la estructura de la envolvente y en la zona de la probeta. Los efectos de borde en la muestra serán más determinantes cuanto mayor sea el grado de aislamiento de la misma; por esta razón, el muro de calibración es un componente idóneo para evaluar los valores máximos de dichos efectos. Los flujos laterales de la envolvente y del premarco aislante se miden mediante los grupos perimetrales de la cara sur de la sala de ensayos, que se han ajustado mediante el factor de corrección correspondiente y mediante el ensayo de calibración. En el caso del muro de calibración, los flujos laterales se miden con los grupos 1 a 4, y el flujo unidimensional con el grupo 5. Los grupos de borde del muro de calibración se corrigen mediante un factor de calibración, siguiendo el proceso de cálculo planteado en el apartado anterior para los grupos de borde de la envolvente. En la Tabla 2.3 se recogen los coeficientes para la determinación del flujo en el eje.

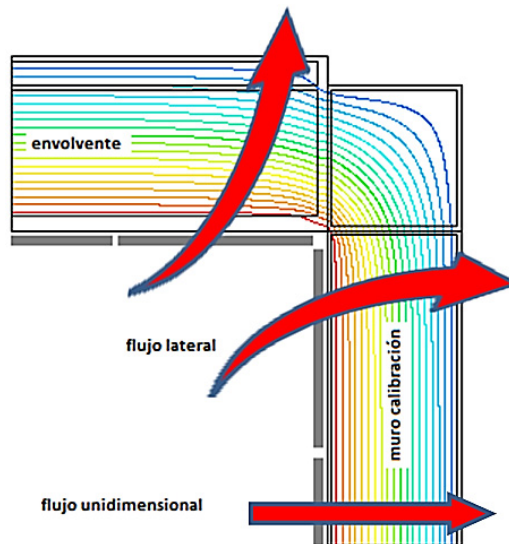


Figura 2.10 – Efectos de borde en el muro de calibración

	lateral	inferior
κ_{0A}/κ_{AB}	14,20	13,65

Tabla 2.3 – Coeficientes de la aproximación lineal del efecto de borde para el muro de calibración

Se observa que la relación entre pendientes es superior a las que se obtienen en los efectos de borde de la envolvente. Esto implica que la superficie afectada por los mismos es más reducida. Por tanto, el diseño del sistema de portamuestras se comporta de forma adecuada y no tiene un efecto representativo sobre el intercambio de flujo de la muestra con el ambiente interior de la celda. De todas formas, es necesario cuantificar dichos efectos. Una primera aproximación para evaluarlos, en el caso del muro de calibración, es calcular la transmitancia lineal (Ψ_{mc}) aprovechando la lectura de los grupos de borde según la ecuación [2.9].

$$\Psi_{mc} = \frac{\sum_{i=1}^5 Q_{hfs_g}(g_i) - \left(\sum_{i=1}^5 A(g_i) \cdot \frac{Q_{hfs_g}(g_5)}{A(g_5)} \right)}{(T_{se,a} - T_e) \cdot L_{borde,mc}} \quad [2.9]$$

Se puede estimar el efecto en la determinación de la transmitancia mediante la ecuación [2.10].

$$\Delta U_{mc} = \frac{\Psi_{mc} \cdot L_{borde,mc}}{\sum_{i=1}^5 A(g_i)} \quad [2.10]$$

Como ya se ha comentado anteriormente, el estudio estático de los efectos de borde simplemente aporta un orden de magnitud de los mismos. En el caso del muro de calibración, el orden es de máxima magnitud, es decir, limita el error máximo por efectos de borde. El análisis de dichos efectos debe realizarse de forma individual para cada componente bajo estudio. La transmitancia y la capacidad térmica del componente modifican el comportamiento dinámico de los efectos de borde, y su repercusión en el estudio. Una forma de poder analizarlos es mediante el uso de modelos de identificación de parámetros, que se describen en el apartado 2.3, que se valida mediante la realización de un ensayo de trazabilidad, ver *Capítulo 3*.

2.2 Resultados de ensayo

A continuación se realiza el cálculo de los factores de calibración de los grupos de borde y el factor total de la celda mediante los datos obtenidos en dos periodos de ensayo. El primer periodo tiene una duración de 21 días y en él se aplican las rutinas de ensayo *ROBLS* y *PRBS*. Tras la realización del mismo se instala una *SAI* (*Sistema de Alimentación Ininterrumpida*) con una etapa de filtrado de potencia basada en un rectificador-inversor, que permite obtener una alimentación más uniforme en la celda. Esta actuación se lleva a cabo debido al elevado ruido de la red eléctrica de la zona. El elevado rizado de la señal de tensión eléctrica aumentaba el ruido de la potencia inyectada en la sala de ensayo y, así mismo, el ruido de medida del conjunto de la instrumentación. Introduciendo una etapa de filtrado, se elimina dicho efecto y se mejora la calidad de medida y, por tanto, de ensayo. Tras esta modificación, se lleva a cabo el segundo periodo de ensayo, de 12 días de duración, en el que se aplica una rutina pulso. Previo al inicio de los ensayos, se realizan las pruebas de presión, y se determina la renovación de aire en la sala de ensayo. Estas pruebas se repiten al final del mismo, antes de acceder a la sala de ensayos, para verificar que los niveles de infiltraciones no se han modificado.

2.2.1 Medida de las infiltraciones

El ensayo de presión permite determinar el porcentaje de la energía de la sala de ensayos que se pierde debido a la renovación de aire. Este valor conviene que sea despreciable para no tener que introducirlo en la parte de modelado, ya que es una componente compleja de determinar experimentalmente. La limitación de infiltraciones que se indica en los procedimientos de ensayo de la metodología *PASLINK* para que pueda ser despreciada en los cálculos es un valor menor a media renovación a la hora, $n_a < 0,5$ [renv/h], para una diferencia de presión de 50 [Pa]. La prueba se realiza generando subpresión y sobrepresión en la sala de ensayo respecto al ambiente exterior. En la Figura 2.11 se muestran los datos experimentales de las pruebas de presión al inicio del ensayo de calibración, y tras su finalización. Para obtener el valor de referencia se determina el caudal de renovación con diferentes

diferencias de presión, que van de 100 [Pa] hasta un valor mínimo de 20 [Pa], en intervalos de 10 [Pa]. Los caudales obtenidos para los ensayos de sobrepresión y subpresión se pasan a condiciones normales, de forma que la temperatura del ensayo no afecte, y se ajustan por mínimos cuadrados mediante una ecuación potencial. De dicho ajuste se obtiene el valor del caudal normal de aire a 50 [Pa]. Para el ensayo de presión de inicio del estudio de calibración, el caudal de renovación de aire obtenido es de $m_a = 3,82 \pm 0,43$ [Nm³/h], y para el ensayo de fin $m_i = 5,90 \pm 0,85$ [Nm³/h]. Estos caudales implican una tasa de renovación del aire de la sala de ensayo de $n_{se} = 0,11 \pm 0,01$ [renv/h] y $n_{se} = 0,16 \pm 0,02$ [renv/h], al inicio y fin del ensayo de calibración, respectivamente.

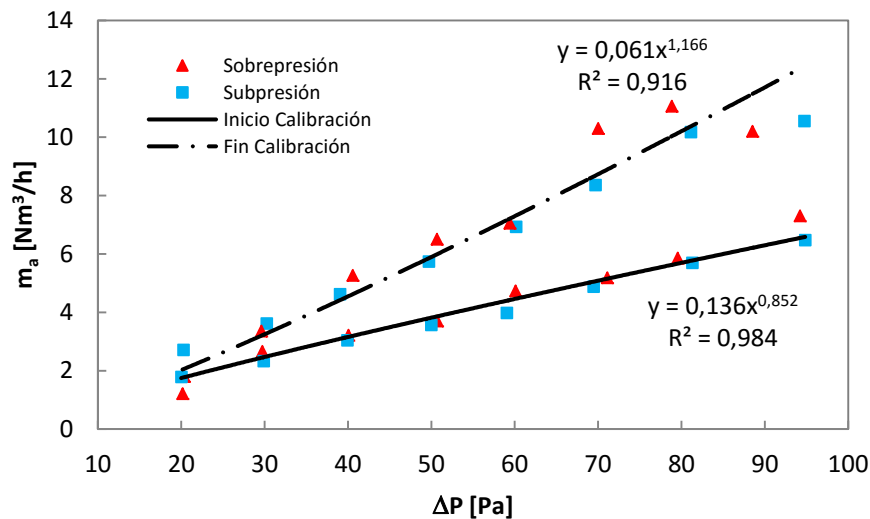


Figura 2.11 – Medida de las infiltraciones al inicio y fin del ensayo de calibración

La incertidumbre de la determinación del caudal de aire se obtiene mediante la media geométrica de la propagación de errores de medida de la instrumentación y del ajuste por mínimos cuadrados, y la varianza entre los resultados de las seis repeticiones del ensayo que se realizan, tres por cada configuración de presión, sobrepresión y subpresión. De la curva de ajuste de aire obtenida en el ensayo de presión, se puede estimar la renovación en condiciones atmosféricas. Para una diferencia de presión de $\Delta P_{se-ext} = 5$ [Pa] y un salto de temperaturas de $\Delta T_{se-ext} = 20^\circ\text{C}$, se obtiene una potencia de evacuación de calor por infiltraciones de $P_a = 2,75$ [W]. En el caso del ensayo de calibración, la potencia nominal introducida es de $P_n = 250$ [W]. Por tanto, las infiltraciones de aire implican un valor inferior al 1,1% de la energía intercambiada en la sala de ensayo. Esto permite despreciar el calor que se intercambia por renovación del aire en el proceso de modelado, y trasladar su efecto al estudio de incertidumbre de medida de la potencia y su propagación en la incertidumbre de los resultados finales obtenidos. Este estudio se realiza de idéntica forma para cada uno de los ensayos que se llevan a cabo en la celda.

2.2.2 Flujos de calor

En el ensayo de calibración, las variables de mayor importancia son los flujos de calor de la envolvente y las temperaturas de aire y superficie. Primero se analizan los flujos que se registran en los diferentes grupos de *tiles*, y posteriormente se analiza la homogeneidad de las temperaturas. En la Figura 2.12 se muestran los perfiles de potencia eléctrica introducida en la sala de ensayo y el flujo de calor total que atraviesa

la envoltante, medido por las *tiles*. En el primer periodo de ensayo se aplican, de forma continua, las rutinas *PRBS* y *ROBLS*. Se puede apreciar que el eje de tiempos es continuo entre ambas rutinas.

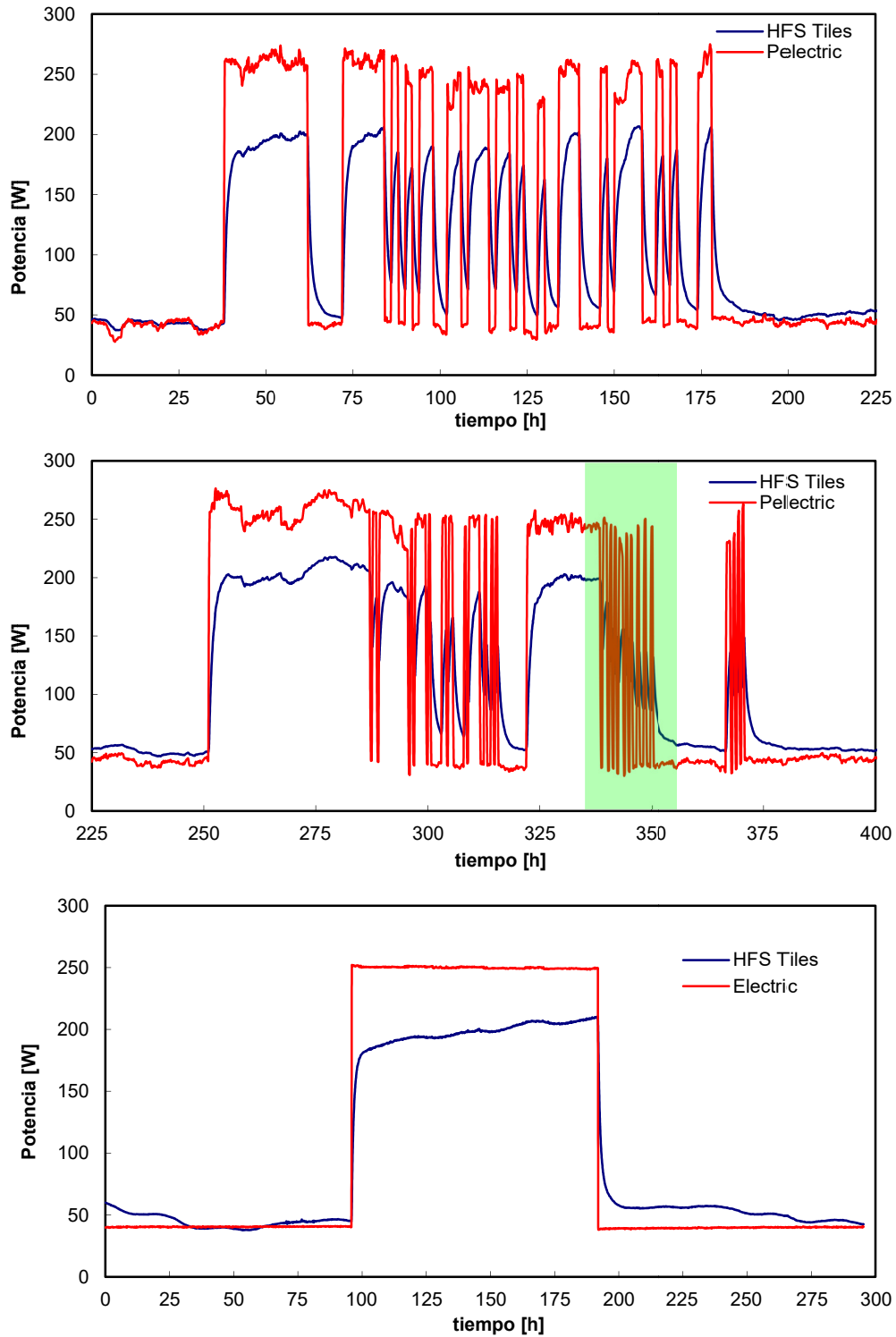


Figura 2.12 – Potencia eléctrica de calentamiento y medida del flujo de las *HFS Tiles* para las rutinas *PRBS*, *ROBLS* y *PULSO*, de arriba abajo

En la curva de potencia eléctrica, el rizado de la señal es importante. Esto se debe a las perturbaciones de la corriente eléctrica de la red. Este rizado se traslada a la señal de las *tiles*, aumentando la componente de ruido de la misma. Para eliminar este efecto, y mejorar la calidad de las señales, para el posterior tratamiento de datos y modelado, se instala un sistema de filtrado de señal en la alimentación de potencia de la celda. De esta forma, no solo se estabiliza la señal de potencia, sino que se mejora la señal de alimentación de los diferentes sensores, y se reduce el ruido de medida de la instrumentación. Se puede apreciar cómo mejora en gran medida la calidad de las señales registradas durante el segundo periodo de ensayo, en el que se aplica un pulso de calentamiento en la sala de ensayos. Se puede apreciar cómo la señal de flujo registrada por las *tiles* responde adecuadamente a las variaciones de potencia. En la Figura 2.13 se muestra, con mayor detalle del eje de tiempos, la evolución del flujo de calor para un periodo en el que se está aplicando una excitación de alta frecuencia.

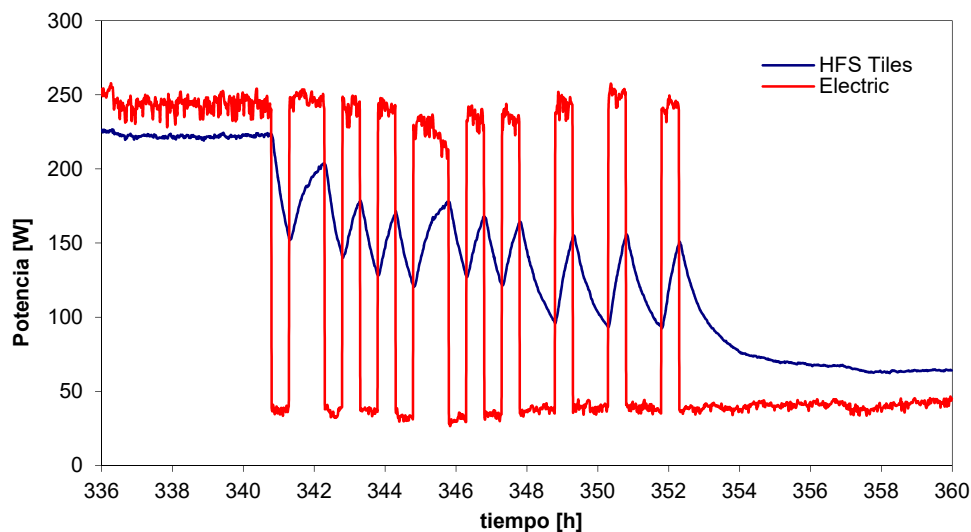


Figura 2.13 –Detalle de la respuesta de las *HFS Tiles* en la medida del flujo en el periodo de alta frecuencia de la rutina *ROLBS*

De forma previa a la determinación de los factores de corrección de los grupos de borde, y del factor de calibración de la celda, se realizan una serie de verificaciones para evaluar la calidad de la medida del flujo de calor. El primer paso consiste en el análisis de los flujos promedios por unidad de superficie, registrados por los diferentes grupos de *tiles*. Como ejemplo se muestran los resultados obtenidos en el ensayo pulso, ya que el análisis es equivalente para el resto de rutinas. En la Figura 2.14 se muestran los promedios de los flujos medidos en cada grupo de *tiles*, en unidades de $[W/m^2]$. Los flujos por unidad de superficie medidos por los diferentes grupos deben tener coherencia física con los diferentes efectos de transmisión de calor. En las zonas centrales de la envolvente de la sala de ensayo se deben dar los flujos de menor magnitud y sus valores deben estar próximos entre sí. Se comprueba cómo los flujos de las paredes este y oeste (CH10 y CH 11 respectivamente) son iguales, seguido del flujo de cubierta (CH12), algo superior, ya que el espesor de aislante es menor. El flujo de suelo (CH13) alcanza el máximo valor, lo que se debe a que es la parte de la envolvente de la sala de ensayos con menor espesor de aislamiento. Esta homogeneidad de flujos en paredes laterales y cubierta se consigue gracias a la atemperación que genera el toldo exterior que envuelve la celda *EGUZKI*, y que minimiza el efecto de la radiación solar, variable a lo largo de las horas del día, y al efecto aleatorio del viento. En la Figura 2.15 se muestra la evolución de los flujos de los citados grupos de *tiles* a lo largo del tiempo.

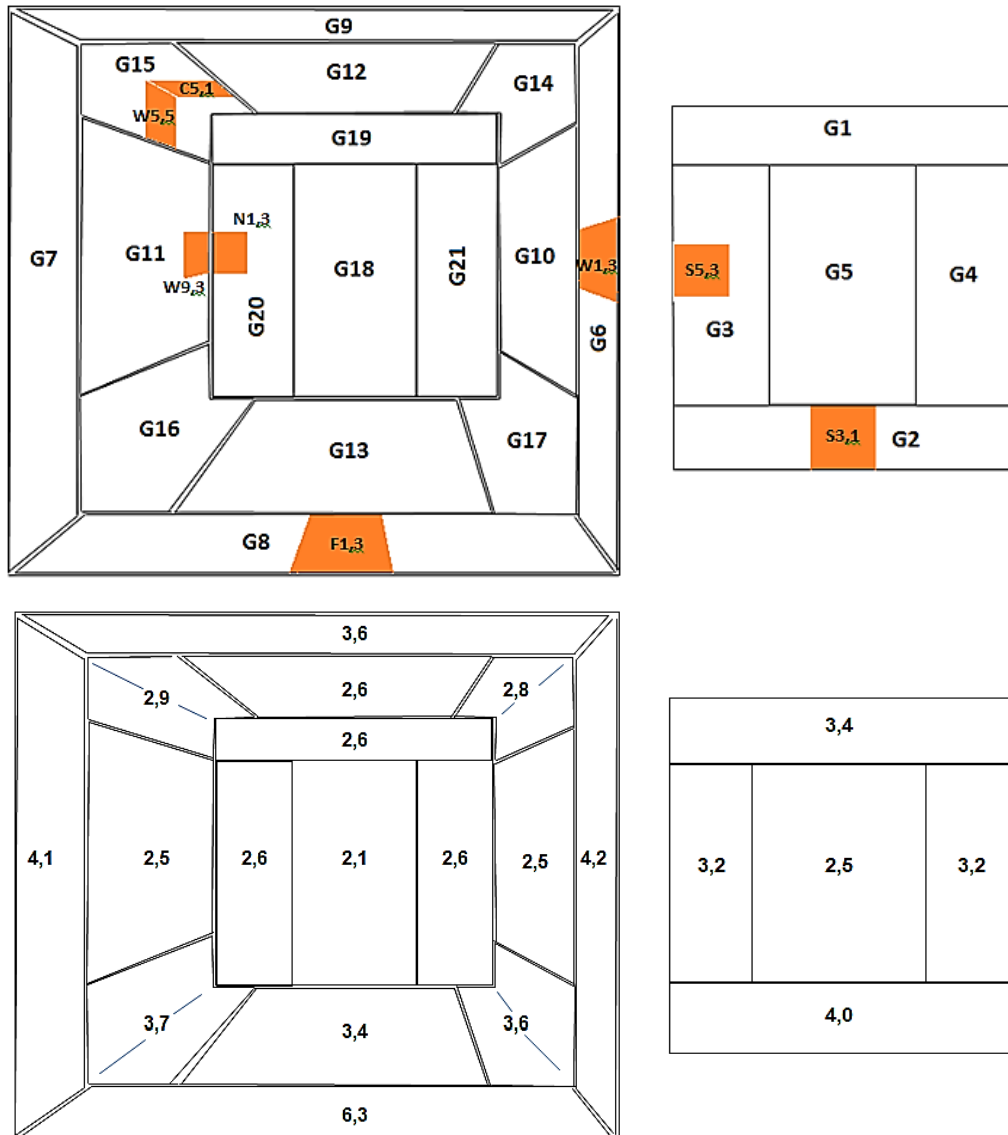


Figura 2.14 – Flujos promedio por unidad de superficie en la cara norte, y envolvente de la sala de ensayos, izquierda, y en el muro de calibración, derecha

Como prueba específica, durante el periodo de calibración, se registran las señales individuales, escogidas aleatoriamente, de varias *tiles* de los grupos centrales de la pared oeste y del suelo. En la Figura 2.16 se puede observar que la respuesta es homogénea para todas las *tiles* registradas, que disponen de una nomenclatura matricial para facilitar su definición y control. Una vez verificados los grupos centrales, es necesario evaluar que los efectos de borde se caractericen adecuadamente. De los modelos numéricos se obtiene que la influencia de dichos efectos no se extiende más allá de las dimensiones de los grupos de borde destinados para su medida. Si esta condición se cumple, los flujos medidos por los sensores situados en la posición C de las *multitiles* debe ser igual al flujo por unidad de superficie registrado por los grupos centrales correspondientes. En la Figura 2.17 se muestra dicha comparativa. La *tile* E1,3 corresponde al grupo 6, y su sensor C registra el flujo unidimensional de la pared este, y por tanto, equivalente al flujo por unidad de superficie que registra el grupo 10.

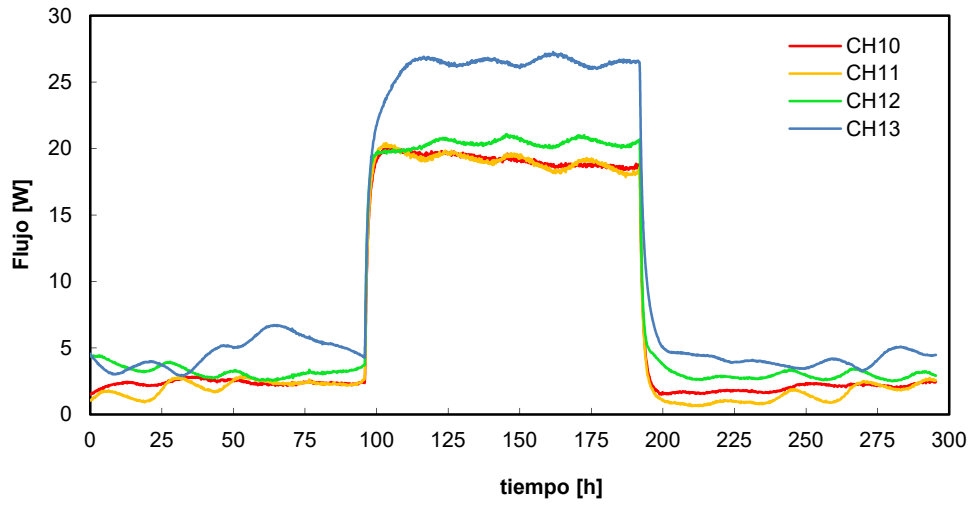


Figura 2.15 – Flujo medido por los grupos centrales de la envolvente de la sala de ensayo

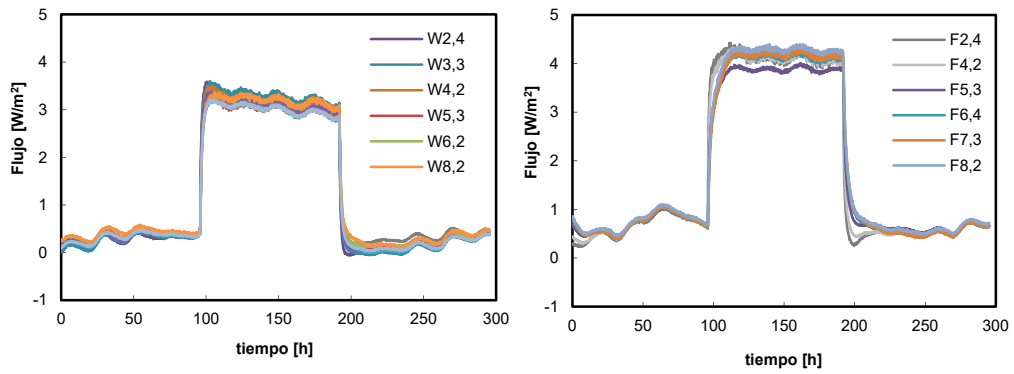


Figura 2.16 – Señal de tiles individuales de los grupos centrales de pared oeste y suelo

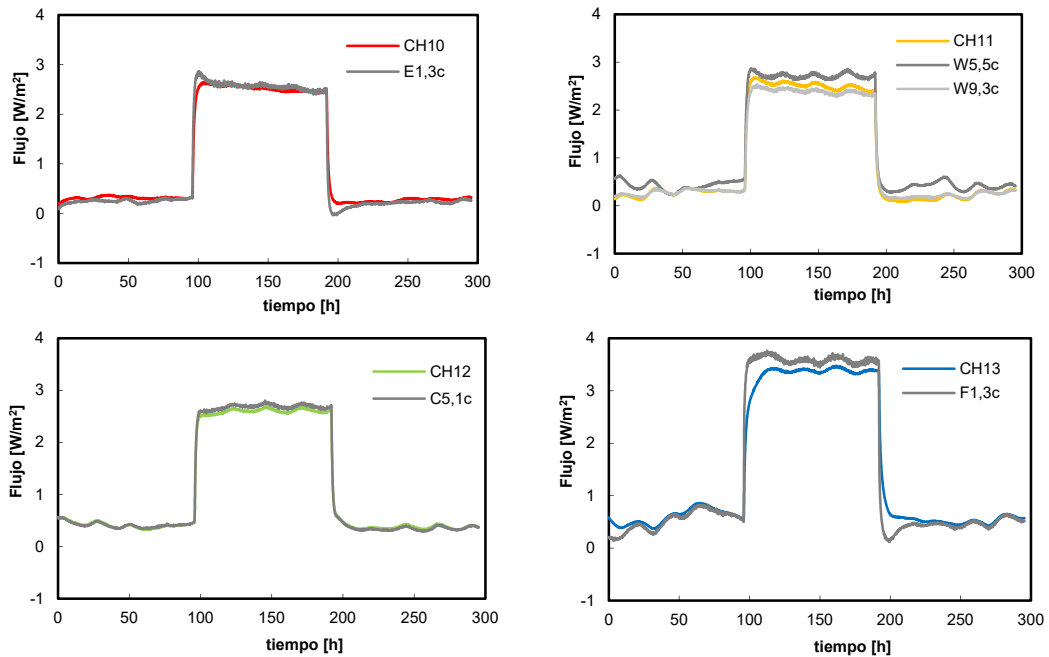


Figura 2.17 – Señal de los sensores situados en la posición C de las multitiles y flujo por unidad de superficie de los grupos centrales equivalentes

El flujo del grupo 11 se puede comparar con la respuesta de dos *multitiles*, la W5,5 que pertenece al grupo 15, y la *multitile* interna al propio grupo 11 en la zona de unión con la pared norte, la W9,3. El grupo 12, de cubierta, se compara con la *multitile* C5,1, situada en el grupo 15, en la posición equivalente a la W5,5. Y por último, el grupo 13, de suelo, se compara con la F1,3, perteneciente al grupo 8, del borde sur. En la Figura 2.14 se puede observar la distribución de las *multitiles* y los grupos centrales asociados. Las pequeñas diferencias registradas son despreciables dentro del rango de incertidumbres de medida. Una vez evaluados los grupos centrales, los siguientes en importancia son los grupos de borde longitudinales, correspondientes a la *tipología 1*. Estos grupos deben registrar un flujo por unidad de superficie superior al de los grupos centrales que lo rodean. Los grupos de borde correspondientes a los ejes de cubierta deben tener un valor próximo entre ambos, al igual que los grupos de borde del suelo.

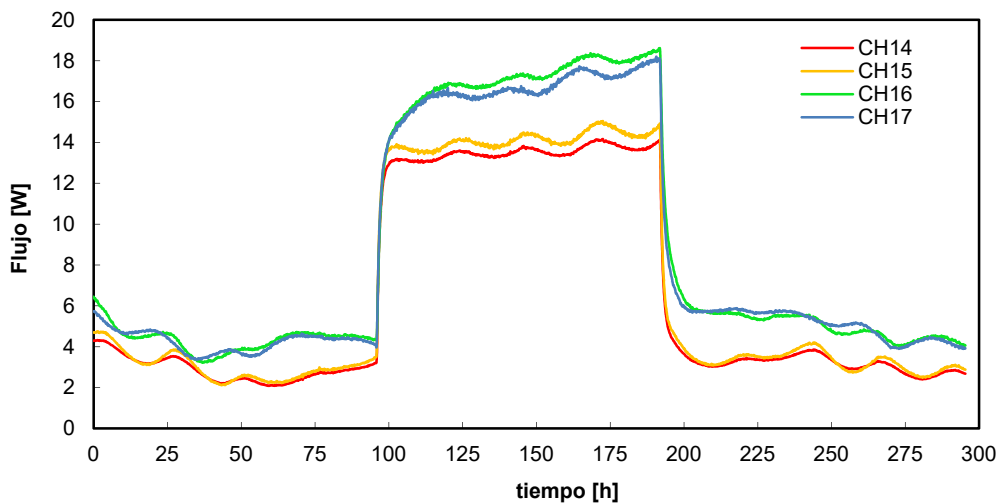


Figura 2.18 – Flujo medido por los grupos de borde longitudinales, tipología 1, de la envolvente de la sala de ensayo

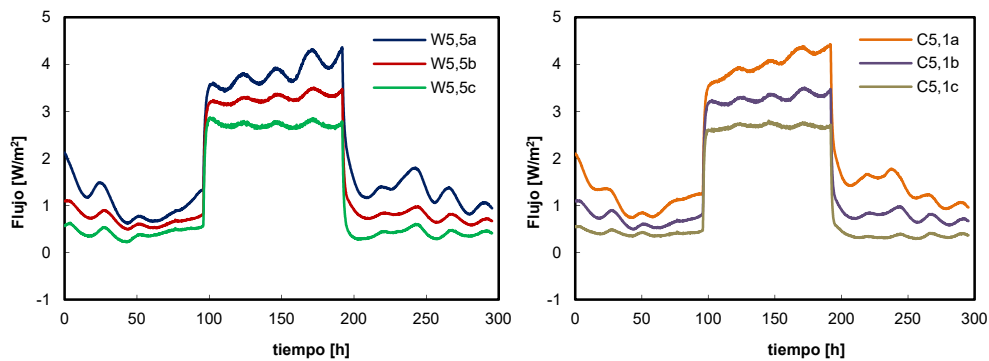


Figura 2.19 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde longitudinales, tipología 1

En la Figura 2.18 se muestra la señal de estos grupos, y la simetría en el comportamiento. Como se plantea en el apartado 2.1.2, la señal de los grupos de borde se ajusta mediante el factor F_c , que determina la relación entre el perfil de flujo real, caracterizado por los tres sensores de la *multitile* asociada, y el valor medido por el sensor B. En la Figura 2.19 se muestra la señal de los sensores de las dos *multitiles* situadas en el grupo 15, que se emplean para la corrección. Se puede apreciar la importancia de la medida adecuada de los efectos de borde. Para el caso de los ejes longitudinales, el flujo total que registran es del orden de magnitud al flujo que

intercambian los grupos centrales, aun teniendo menor superficie. Los siguientes grupos en importancia son los correspondientes a los efectos de borde de la cara sur, *tipologías 2 y 3*. Como se puede ver en la Figura 2.20, estos efectos de borde generan los flujos por unidad de superficie mayores.

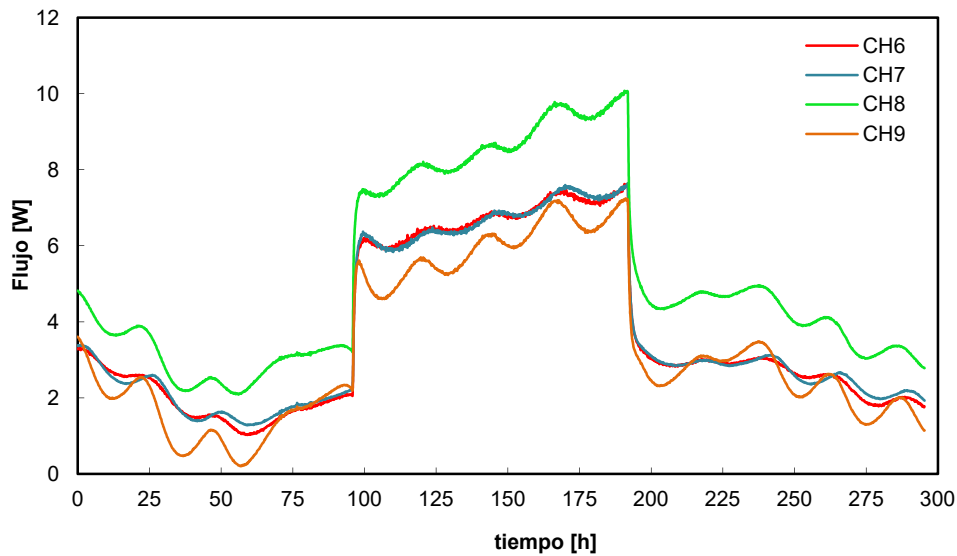


Figura 2.20 – Flujo medido por los grupos de borde sur, *tipología 2 y 3*, de la envoltura de la sala de ensayo

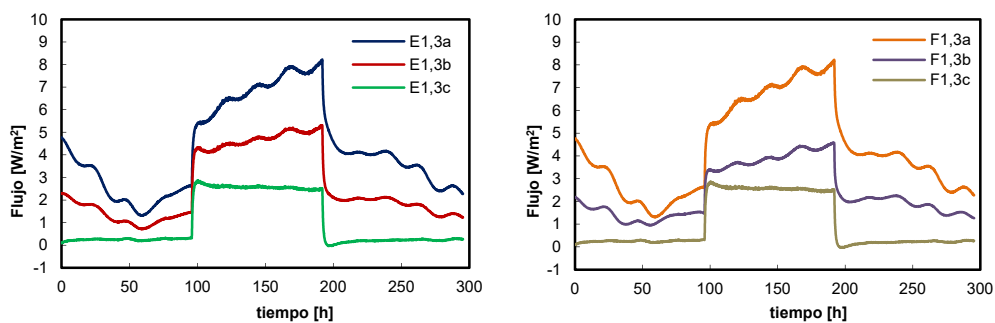


Figura 2.21 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde sur, *tipología 2 y 3*

Esto se debe a que el resto de la envoltura está apantallada por el toldo exterior, que homogeniza las condiciones exteriores de la envoltura de la sala de ensayo. La zona sur está expuesta directamente al ambiente exterior, con el efecto de la radiación. Además, en esta zona se produce la mayor divergencia en la configuración constructiva de la envoltura, por la disposición del sistema de portamuestras. En la Figura 2.20 se muestra la señal registrada para dichos grupos. Se aprecia que el mayor intercambio de calor se produce en el borde del suelo. Esto se corresponde con la configuración de materiales del premarco aislante, ya que en la zona inferior, por requerimientos mecánicos, está formado por vidrio celular de conductividad $\lambda_{vc} = 0,048$ [W/mK], superior a la del poliestireno expandido, $\lambda_{eps} = 0,035$ [W/mK], del resto de lados. A esto hay que sumarle que el espesor de premarco aislante es inferior en la zona del suelo, en comparación con el espesor de las paredes y de la cubierta. Esta es la razón por la que el eje inferior se trate como una *tipología* específica de efecto de borde y se disponga un *multitile* en dicho grupo. En la Figura 2.21 se muestran las señales registradas por los sensores de las *multitiles* situadas en el grupo de borde de la pared este y en el suelo, para la caracterización de la *tipología 2 y 3*, respectivamente.

Se observa cómo los valores de flujo son superiores a los registrados por las *multitiles* de los grupos longitudinales, y en especial en la zona de borde correspondiente al suelo. En las señales de la *multitiles* F1,3, se aprecia que el gradiente entre los flujos de la posición B y de la posición A es superior al gradiente entre dichos sensores para otras zonas de borde. Para finalizar el análisis del flujo que atraviesa la envolvente de la sala de ensayos, queda por evaluar los grupos de la cara norte, correspondiente a la pared de separación con la sala de ensayos. En la Figura 2.22 se muestra la señal de estos grupos. Se puede apreciar la simetría de las medidas de los dos grupos laterales que rodean la puerta de acceso.

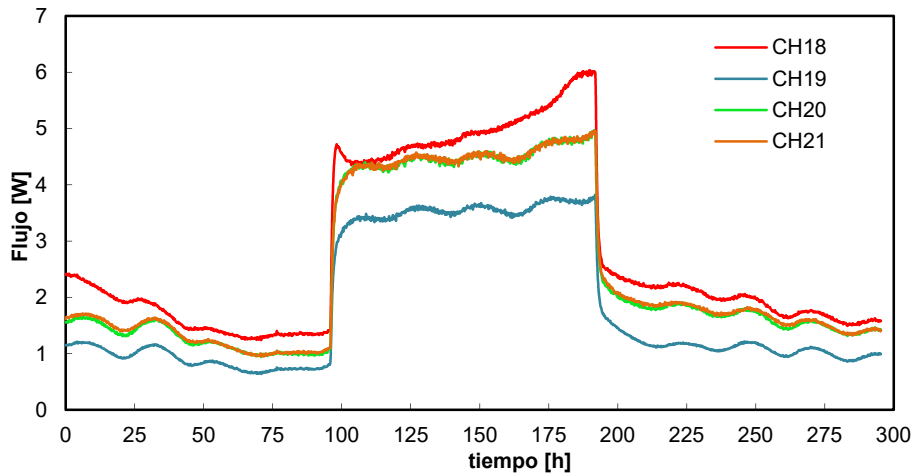


Figura 2.22 – Flujo medido por los grupos de borde norte, *tipología 4*, de la envolvente de la sala de ensayo

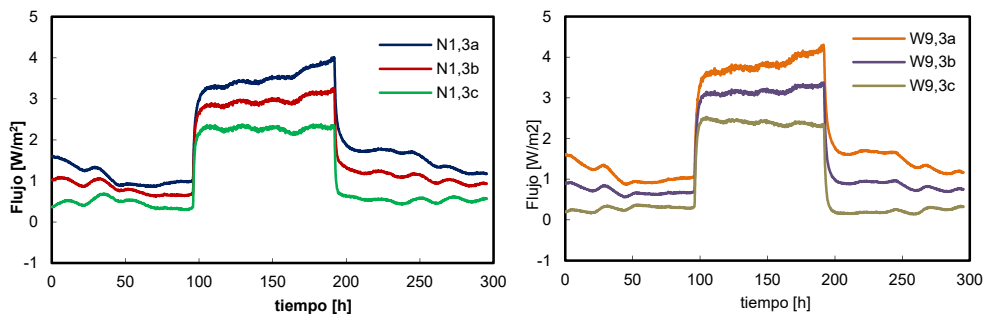


Figura 2.23– Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde norte, *tipología 4*

Los grupos de borde de la pared norte presentan flujos por unidad de superficie similares a los flujos medidos por los grupos centrales, ver Figura 2.14. El flujo en la zona de la puerta es el de menor magnitud, lo que concuerda con la configuración física, ya que además de disponer del mismo espesor de aislamiento que las paredes de la sala de ensayo, dispone de la puerta exterior de sellado, que aporta una capa de aislamiento complementaria. Para los efectos de borde de la *tipología 4* se toma un factor de corrección $F_c = 1$, ya que es la zona con menor gradiente de temperatura, como reflejan los valores absolutos de flujo medidos por éstos, muy inferior al del resto de grupos. Esta condición se verifica tras el análisis de los flujos por unidad de superficie y por la señal obtenida en los sensores de las *multitiles* situadas en el grupo 20 y en el grupo 11, representadas en la Figura 2.23. Se aprecia cómo los flujos medidos por los diferentes sensores están más próximos, lo cual indica que el efecto de borde es reducido.

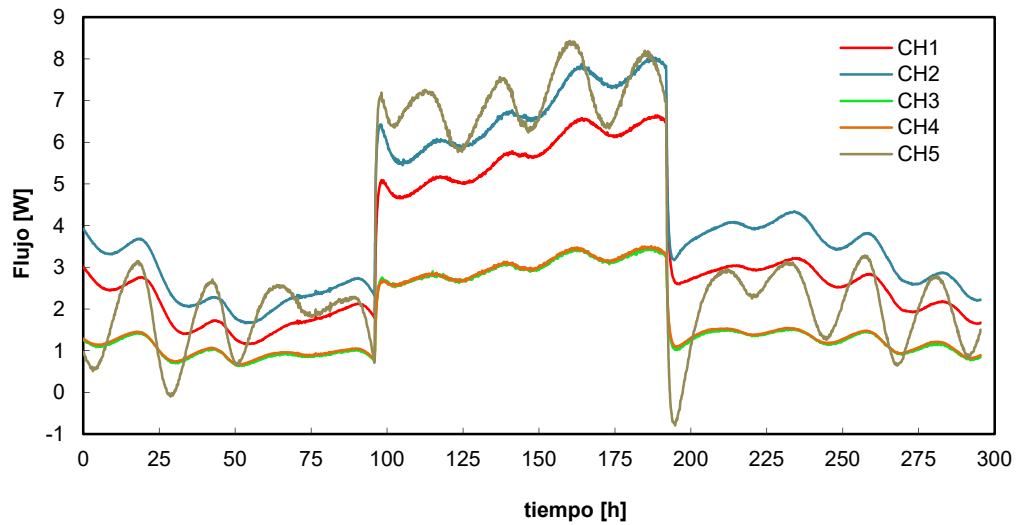


Figura 2.24– Flujo medido por los grupos del muro de calibración

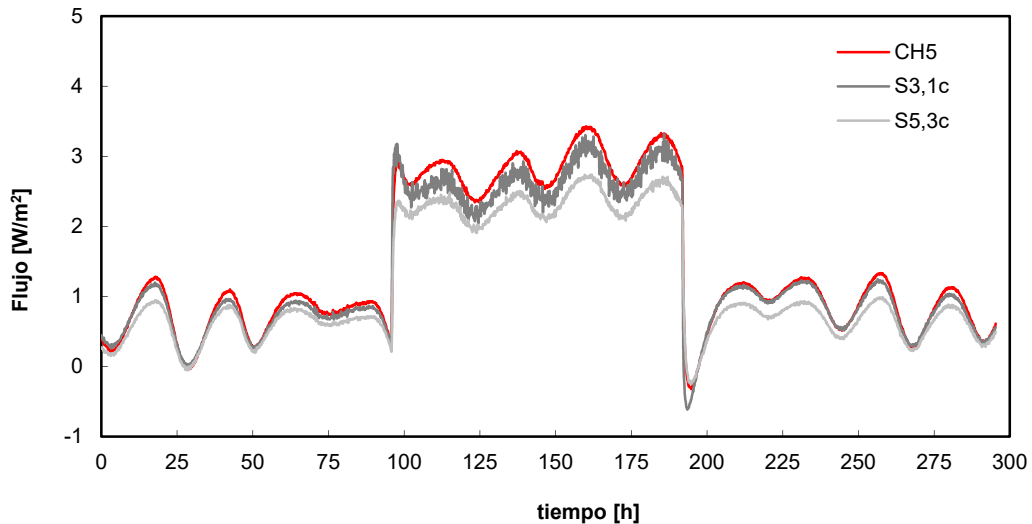


Figura 2.25– Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie del grupo central del muro de calibración

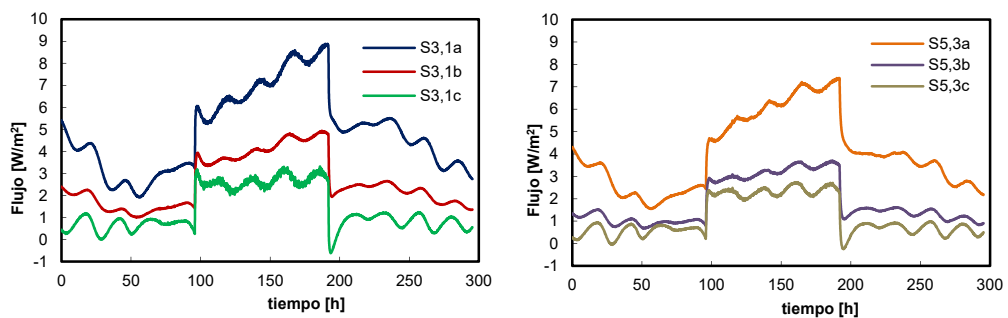


Figura 2.26– Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde en el muro de calibración

Por último, sólo queda por evaluar el comportamiento del muro de calibración, que permite determinar el factor total de calibración de la celda y analizar el comportamiento del sistema de portamuestras. En la Figura 2.24 se muestran las

señales de los cinco grupos instalados sobre el muro de calibración. Se puede apreciar una mayor oscilación en la señal de flujo, principalmente en la zona central, correspondiente al grupo 5, debido a los ciclos diarios de radiación solar y temperatura ambiente exterior. Aun así, el flujo medio por unidad de superficie en la zona central es similar a los flujos centrales de la envolvente de la sala de ensayo. Esto verifica el objetivo de obtener un cerramiento homogéneo en toda la sala de ensayo, para así, optimizar el proceso de calibración de la celda. Se puede observar la simetría entre la señal de los dos grupos laterales, siendo el grupo de la zona inferior el que presenta un mayor flujo, debido al menor aislamiento de la zona inferior del premarco aislante. Al igual que se analiza el alcance del efecto de borde para la envolvente, se evalúa para el muro de calibración. En la Figura 2.25 se muestran las señales de los sensores C de las dos *multitiles* instaladas en los grupos de borde del muro de calibración respecto al flujo por unidad de superficie del grupo 5. Se aprecia que la señal es próxima entre los tres casos. Por último, sólo queda determinar los factores de corrección de los grupos de borde del muro de calibración. En la Figura 2.26 se muestran las señales de los sensores de las *multitiles* instaladas en los grupos 2 y 3. El efecto de la diferente composición del premarco aislante hace necesario estudiar por separado el efecto de borde inferior del resto de los grupos perimetrales.

2.2.3 Temperaturas

Uno de los objetivos del diseño de la celda *PASLINK* es disponer de un modelo lo más simple posible que represente con total precisión el comportamiento térmico de la sala de ensayos. Un paso fundamental en este objetivo es conseguir una temperatura de aire homogénea, de forma que no se produzcan estratificaciones, y el volumen interior se pueda representar con una única temperatura como se muestra en la Figura 2.27, donde se representa la temperatura media de aire y de superficie de la sala de ensayo para las diferentes rutinas aplicadas, y la temperatura de ambiente exterior. Como criterio para considerar condiciones de homogeneidad, en las temperaturas de aire, se toma una diferencia máxima de $\Delta T_{max} \leq 0,5^{\circ}\text{C}$. En la Figura 2.28 se muestran las temperaturas de aire de las ocho sondas que caracterizan el ambiente interior de la sala de ensayos, para el momento de entrada del sistema de calefacción en la rutina pulso. Este periodo es en el que se producen las máximas diferencias. Se puede comprobar cómo las temperaturas están muy próximas en el periodo libre de excitación, con una divergencia inferior a la propia incertidumbre de medida. Iniciado el periodo de calentamiento se aprecia una separación de las curvas, no superándose en ningún momento el criterio de homogeneidad, representado por las dos líneas discontinuas de color rojo. Gracias a la agitación del aire que realiza el ventilador tangencial, la temperatura de superficie se mantiene también con un comportamiento homogéneo, como muestra la Figura 2.29. Únicamente, se produce una mayor divergencia en la temperatura de la superficie del muro de calibración. Esto se debe a que la salida de aire del cajón que contiene el ventilador, y la resistencia eléctrica, están orientados hacia la pared sur, con el objetivo de maximizar la homogeneidad de temperaturas en la muestra. En el caso de las temperaturas de las paredes de la sala de ensayo, los valores no difieren más de $0,5^{\circ}\text{C}$. Para verificar que en el muro de calibración no se producen gradientes de temperatura representativos, se instalan cinco sondas de temperatura complementarias que cubren la superficie completa. En la Figura 2.30 se muestra la evolución de dichas temperaturas, con diferencias máximas inferiores a 1°C . En la Figura 2.31 se muestra la evolución de las diferencias de temperatura máximas para aire y superficie a lo largo de la rutina pulso.

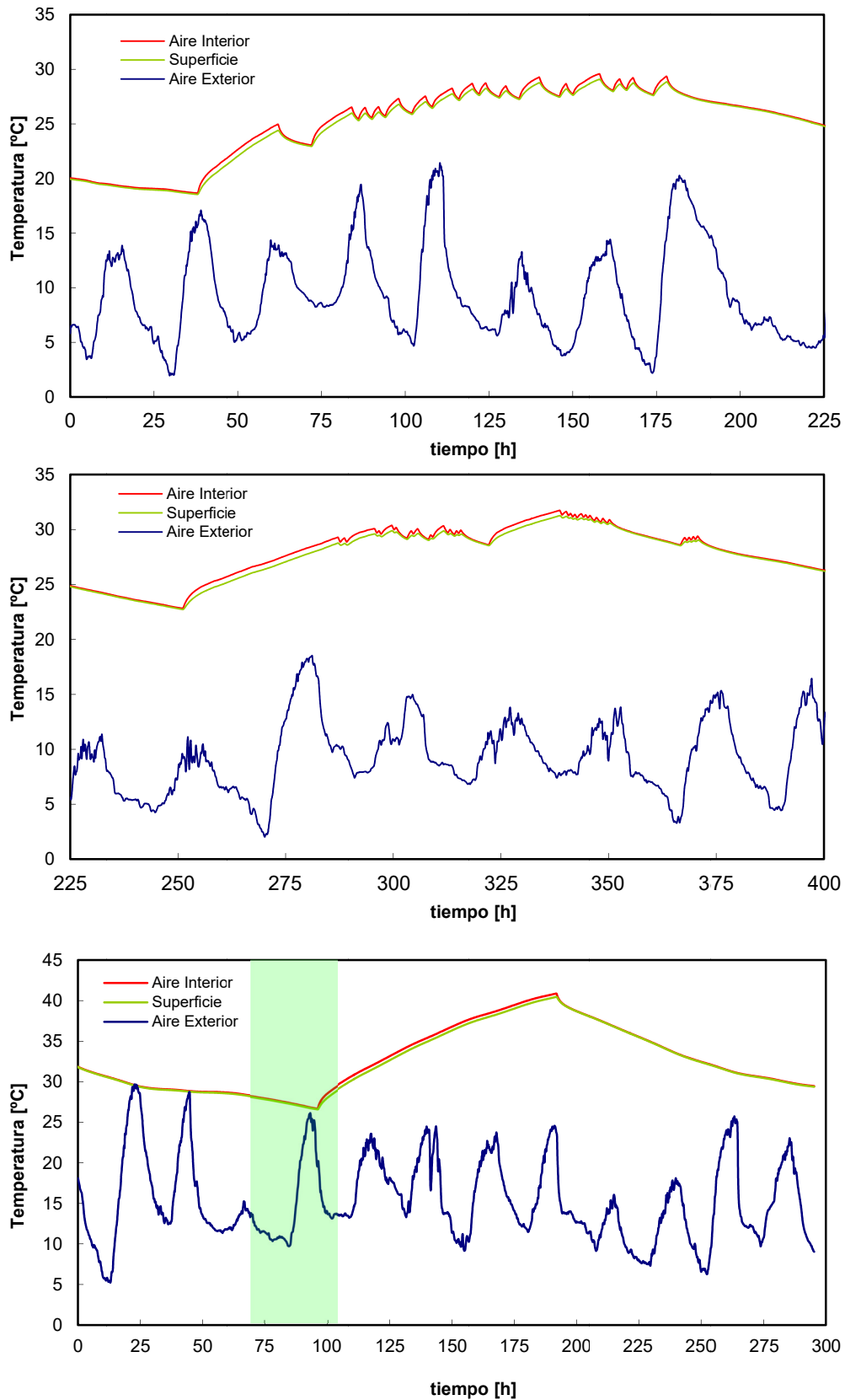


Figura 2.27– Temperaturas de aire y superficie de la sala de ensayos y temperatura exterior ventilada para las rutinas PRBS, ROLBS y PULSO, de arriba abajo

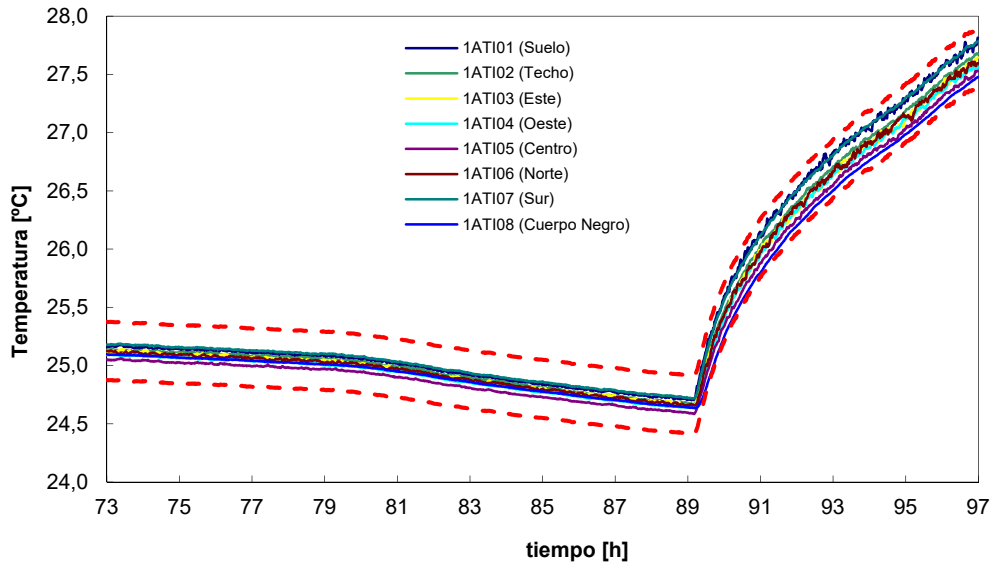


Figura 2.28– Temperaturas de aire en la sala de ensayos

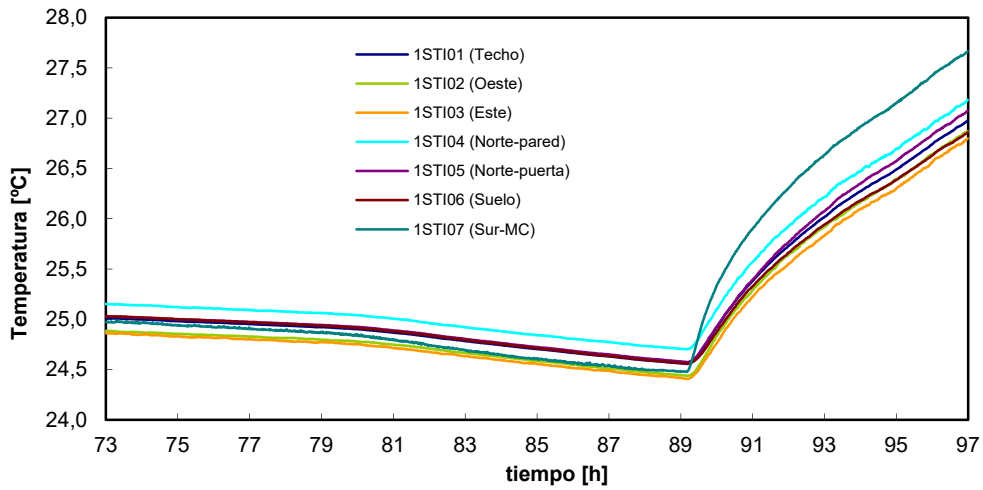


Figura 2.29– Temperaturas de superficie en la sala de ensayos

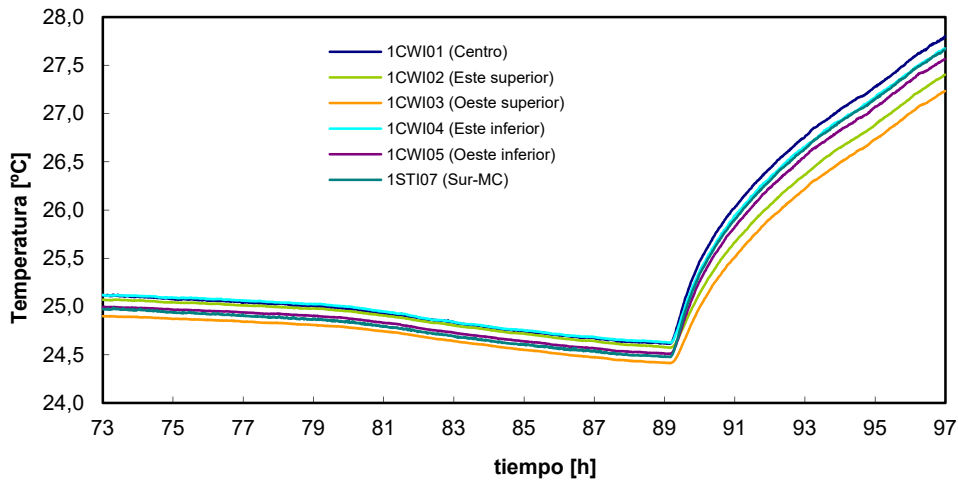


Figura 2.30– Temperaturas de superficie en el muro de calibración

En la diferencia de superficie sólo se toman las temperaturas de las paredes de la envolvente de la sala de ensayos, ya que durante la ejecución de los ensayos, es la temperatura que interesa controlar. Por su parte, la temperatura de la superficie de la muestra será variable en función de las características de la misma. Evaluadas las diferencias máximas de temperatura, tanto para el aire como para las superficies de la sala de ensayo, se puede tomar como válida la representación del comportamiento del volumen interior mediante los valores medios de las mismas. Como se ha comentado en el apartado 2.1.1, durante el ensayo se deben alcanzar saltos de temperatura superiores a 20°C entre el aire interior de la sala de ensayos y la temperatura exterior. Como se muestra en la Figura 2.32, una vez arranca la rutina de calefacción, el salto de temperatura medio integrado entre ambientes, línea roja gruesa, alcanza dicho valor, aunque las variaciones diarias sean inferiores en determinadas horas del día. Un aspecto importante a tener en cuenta en el proceso posterior de modelado del comportamiento de la celda, es la pequeña diferencia de temperatura que se produce entre el aire y la superficie de la sala de ensayos. Estas temperaturas no se separan más de 0,6°C durante el periodo de calentamiento, y se igualan durante los periodos libres. Este análisis se muestra para la rutina *PULSO*, pero los resultados del resto de rutinas de ensayos presentan valores equivalentes.

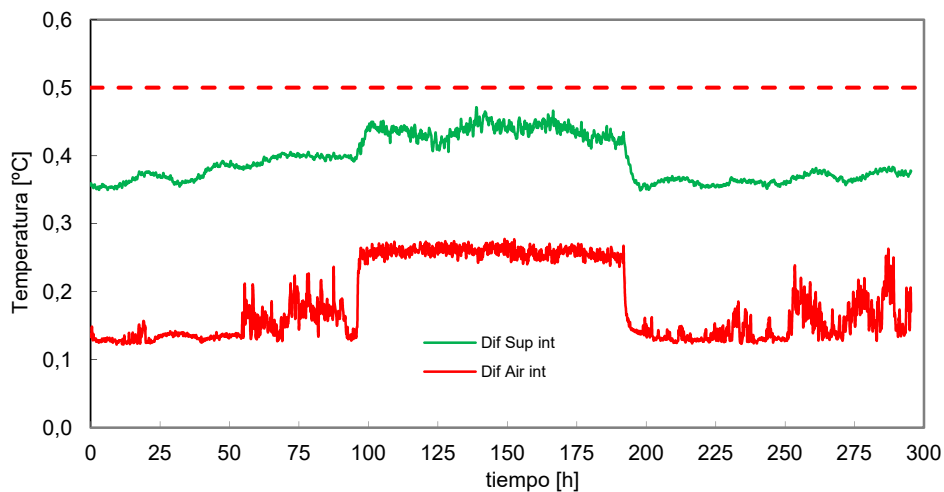


Figura 2.31 – Diferencias máximas para las temperaturas de aire y superficie de la sala de ensayos durante la rutina pulso

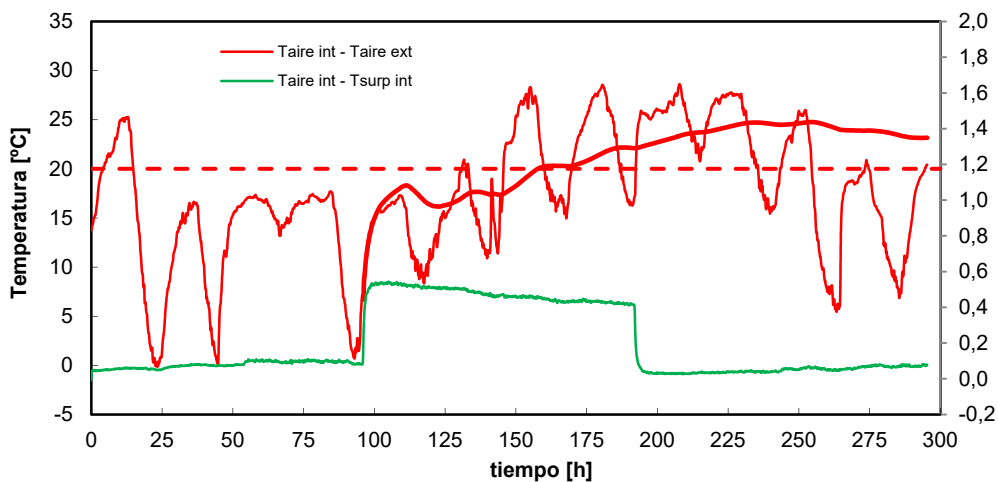


Figura 2.32– Salto de temperatura entre el ambiente interior y el exterior, eje izquierdo, y entre ambiente y superficie, eje derecho, durante la rutina pulso

2.2.4 Factores de calibración

El primer paso en la calibración consiste en la determinación de los factores de corrección de los grupos de borde. Estos factores se determinan mediante la metodología planteada en el apartado 2.1.2 para cada una de las rutinas de ensayo, tomando como valor definitivo el promedio de los factores instantáneos. En la Figura 2.33 se muestran los perfiles de flujo medidos para las diferentes tipologías de efectos de borde en el instante $t = 150$ [h], durante la rutina *PULSO*. Hay que tener en cuenta que el factor de corrección, F_c , no es un indicador de la magnitud del efecto de borde, sino que permite ajustar la medida del sensor de flujo situado en la posición B respecto al valor integrado del flujo real en dicho borde. Estos efectos se caracterizan mediante la forma del perfil de flujos y mediante la relación entre el flujo máximo y el flujo unidimensional. Se puede apreciar que los efectos de borde de la *tipología 1* presentan una desviación entre el flujo máximo y el flujo unidimensional mucho más pequeña que en las *tipologías 2 y 3*. También se puede observar que la forma del perfil de flujos varía entre tipologías, debido al nivel de aislamiento y a la geometría y composición estructural. En la Tabla 2.4 se recogen los valores de los factores de corrección obtenidos para cada *multitile* en las diferentes rutinas de ensayos.

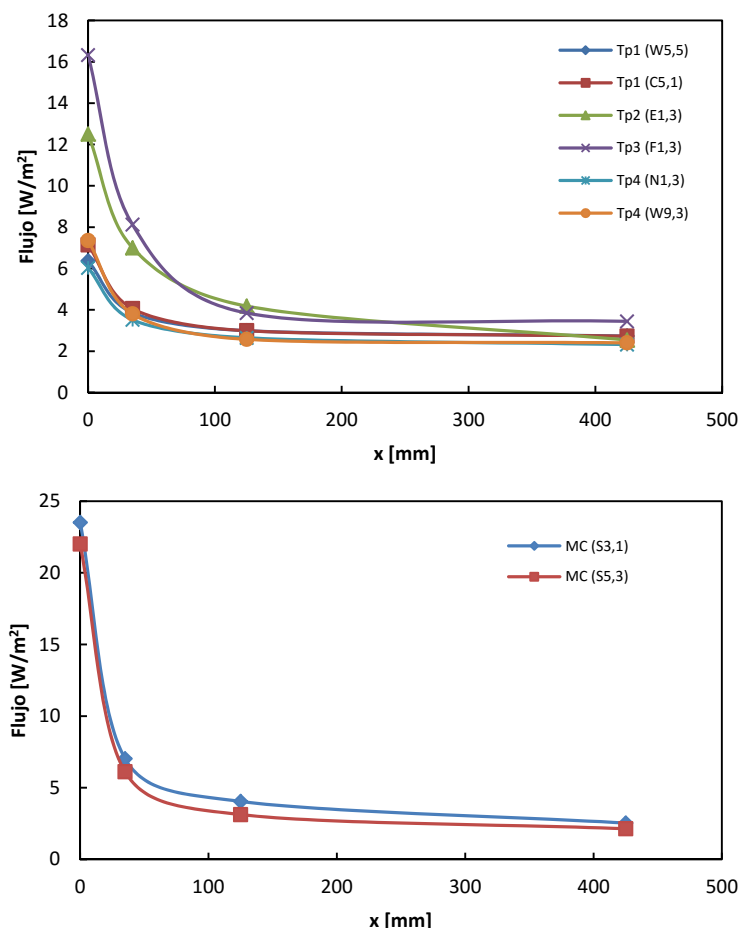


Figura 2.33– Perfiles de flujo en las zonas de borde para el instante 150 [h] durante la rutina *PULSO*

Una vez evaluados los resultados, se definen los factores de corrección definitivos, que se indican en la Tabla 2.5, y que se aplican para la determinación del flujo final de los grupos de borde correspondientes. Los valores se obtienen de la integración del cada

uno de los periodos de ensayo. Para el caso de las rutinas *PRBS* y *ROLBS*, en las que todavía no se disponía del sistema de filtrado de potencia, el rizado de la señal no genera ningún efecto en los resultados, gracias a la alta frecuencia de muestreo y a la precisión de la medida de la potencia inyectada y de la precisión en la medida de la señal de tensión continua de la señal de las *tiles*.

	T-1		T-2	T-3	T-4		MC	
	W5,5	C5,1	E1,3	F1,3	N1,3	W9,3	S3,1	S5,3
PULSO	1,021	1,036	1,130	1,174	1,008	1,078	1,028	1,126
PRBS	1,056	1,041	1,119	1,165	0,991	1,048	1,046	1,104
ROLBS	1,066	1,026	1,125	1,156	0,995	1,085	1,040	1,136

Tabla 2.4 – Factores de corrección para cada *multitile* en las tres rutinas de ensayo

Tipología	Grupo	F_c
Tp1	(14,15,16,17)	1,041 ± 0,011
Tp2	(6,7,9)	1,125 ± 0,005
Tp3	(8)	1,165 ± 0,009
Tp4	(19,20,21)	1,070 ± 0,019
MC	(1,3,4)	1,038 ± 0,009
	(2)	1,122 ± 0,016

Tabla 2.5 – Factores de corrección finales para cada tipología de grupo de borde

Una vez determinados correctamente los flujo de borde, el siguiente paso es valorar la relación entre los mismos y los flujos centrales, en los que se dan condiciones unidimensionales. En la *Guía de Instalación de la HFS Tiles*^[16], se indica que la relación entre la señal de los grupos de borde longitudinales es del orden de $G_{long} = 1,2 \pm 0,1$, y el ratio esperado para los efectos de borde sur es de $G_{sur} = 1,5 \pm 0,2$. Para la celda *EGUZKI* se obtiene que el ratio, obtenido del cociente entre los flujos por unidad de superficie de los grupos longitudinales respecto a los grupos centrales asociados, ver Figura 2.14, es:

$$G_{long} = 1,11 \pm 0,10$$

y el ratio de los grupos de borde sur, respecto al grupo central del muro de calibración:

$$G_{sur} = 1,57 \pm 0,19$$

Por último, se determina el factor de calibración global de la celda, según la ecuación [2.2]. Los resultados obtenidos en cada rutina se muestran en la Tabla 2.6.

	$f_{c,t}$
PRBS	1.091
ROLBS	1.051
PULSO	1.066

Tabla 2.6 – Factores de calibración global obtenido en cada rutina de ensayo

Siendo el valor final de calibración de la celda el promedio de los resultados obtenidos:

$$f_{c,t} = 1,069 \pm 0,020$$

Este factor permite corregir el intercambio de energía dentro de la sala de ensayos que no es registrado por las *tiles*, como por ejemplo las infiltraciones de aire, la transmisión de calor por cableado de la sensórica, etc.... Como el factor $f_{c,t} < 1,2$, el sistema de medida del intercambio de calor de la sala de ensayos se puede considerar adecuadamente representado y medido por las *tiles*, y por tanto, se puede pasar a la fase de modelado de la celda.

2.3 Modelos matemáticos de la celda

El ensayo de calibración no sólo permite determinar el factor global de la celda, sino que también proporciona información para desarrollar el modelo matemático que define el comportamiento de la sala de ensayos. Como se ha comentado anteriormente, el procedimiento *PASLINK* trabaja con modelos de parámetros concentrados. Estos modelos son una aproximación de las ecuaciones de transmisión de calor, pero que presentan una alta precisión para el rango de trabajo en la edificación, y su relativa simplicidad, permite un proceso de identificación de parámetros robusto y fiable. Junto con el procedimiento de ensayo, en la metodología *PASLINK*, se han desarrollado dos herramientas de identificación de parámetros aplicables a los modelos de parámetros concentrados de la celda. A continuación se describen dichas herramientas y se aplican a la determinación del modelo de la celda *EGUZKI*, lo que permite una verificación de los resultados obtenidos, como paso final, en el proceso de calibración.

2.3.1 Herramientas de identificación de parámetros

Para la determinación de las propiedades térmicas de las muestras bajo ensayo se aplican dos herramientas de trabajo, el *LORD* (*Logical R Determination*), y el *CTSM* (*Continuous Time Stochastic Modeling*). A continuación se describen las bases de trabajo de dichas herramientas. El proceso físico de transmisión de calor en una fachada se puede formular mediante un modelo de parámetros concentrados mediante la ecuación [2.11], en la que se muestra el balance de energía para un nodo genérico del modelo, ver Figura 2.34.

$$C_i \frac{dT_i(t)}{dt} = \sum_j H_{ij} \cdot T_j(t) + \sum_k H_{ik} \cdot T_k(t) + \sum_l A_{il} \cdot Q_l(t) \quad [2.11]$$

Donde:

C_i : capacidad térmica del nodo i

H_{ij} : conductancia entre el nodo i y un nodo interno j

H_{ij} : conductancia entre el nodo i y un nodo externo k

A_{il} : admitancia de flujo, que acopla la entrada de flujo al balance del nodo

El conjunto de ecuaciones de balance, aplicadas a cada nodo del modelo, forma un sistema de ecuaciones diferenciales que se puede representar de forma matricial

según la ecuación [2.12]. En el apartado 3.4.2 se muestra la aplicación para un modelo concreto.

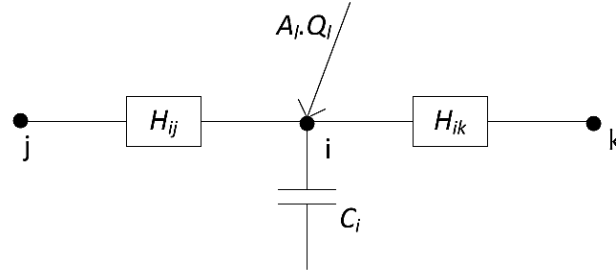


Figura 2.34– Modelo base de parámetros concentrados de la transmisión de calor en un cerramiento

$$\begin{aligned} \{dT\} &= [A]\{T\}dt + [B]\{U\}dt \\ \{Y\} &= [C]\{T\} + [D]\{U\} \end{aligned} \quad [2.12]$$

El modelo corresponde a un caso particular de modelos de espacio de estados, donde:

- $\{T\}$: vector de estado, formado por las temperaturas en cada nodo
- $[A]$: matriz dinámica del sistema, contiene las propiedades térmicas del modelo
- $[B]$: matriz de comando, que define cómo las excitaciones afectan al modelo
- $\{U\}$: vector de entradas, formado por las variables de excitación, como temperaturas de aire, radiación solar, etc...
- $\{Y\}$: vector de medidas, formado por las variables objetivo que se registran, como temperaturas y flujos superficiales.
- $[C]$: matriz de observaciones, relaciona las variables medidas con las variables de estado
- $[D]$: matriz de acoplamiento directo, relaciona las variables medidas con las variables de entrada

Una vez planteado el modelo, es necesario definir varios aspectos que condicionan el proceso de identificación de parámetros. El primero es la discretización de la variable temporal, ya que el modelo corresponde a una serie de tiempo continuo y los datos registrados en el ensayo son de carácter discreto. El segundo punto es la definición de la función objetivo, cuya minimización permitirá obtener los parámetros buscados. Y en tercer caso, la selección del algoritmo de minimización, de forma que se asegure la obtención del mínimo global, salvando posibles mínimos locales. A continuación se describe cómo resuelven estos aspectos las dos herramientas de trabajo.

2.3.1.1 LORD

La discretización de la variable tiempo se realiza mediante la aproximación de diferencias finitas de las derivadas temporales, ecuación [2.13].

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad [2.13]$$

De forma que el modelo queda representado por un sistema de ecuaciones lineales, ver [2.14], que tiene una resolución numérica sencilla, que se aplica en cada intervalo.

$$\begin{aligned} \{T(t)\} - \{T(t - \Delta t)\} &= [A]\{T(t)\}\Delta t + [B]\{U(t)\}\Delta t \\ \{Y(t)\} &= [C]\{T(t)\} + [D]\{U(t) + T(t - \Delta t)\} \end{aligned} \quad [2.14]$$

La función objetivo a evaluar se construye como el cuadrado de la diferencia entre los valores medidos y los valores calculados, ecuación [2.15].

$$\begin{aligned} N(\theta) &= \sum_{i=1}^n V(i)^2 \\ V(i) &= (Y_{med} - Y_{calc}) \end{aligned} \quad [2.15]$$

Donde se emplea el contador i para referir cada uno de los intervalos de tiempo, y por tanto, cada una de las mediciones de las variables de entrada registradas durante el ensayo, siendo n el número total de medidas disponibles. Los parámetros óptimos del modelo serán los que minimizan la función objetivo, ecuación [2.16]. Este método se denomina *OEM (Output Error Method)*, ya que representa la desviación entre los valores medidos y los valores calculados por el modelo una vez evaluado todo el conjunto completo de datos de trabajo en el ensayo.

$$[\theta]_{opt} = arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^n (Y_{med} - Y_{calc})^2 \quad [2.16]$$

En los casos con más de una función de salida, correspondientes a más de una variable medida, para obtener una función objetivo única es necesario aplicar un procedimiento ponderado, ecuación [2.17].

$$N^2(\theta) = \sum_{i=1}^n V'(i) \cdot Z^{-1} \cdot V(i) \quad [2.17]$$

Siendo Z un residuo ponderado a cada una de las variables objetivo según la ecuación [2.18]:

$$Z(p, q) = \sum_{i=1}^n \frac{V(p, i) \cdot V(q, i)}{n} \quad [2.18]$$

Donde:

- $V(p, i)$: es la diferencia entre el cálculo y la medida para la variable $Y(p)$
- $V(q, i)$: es la diferencia entre el cálculo y la medida para la variable $Y(q)$

Una vez definida la función objetivo, para determinar el vector de parámetros que la minimiza se aplica el método de *Downhill-Simplex*. Este procedimiento consiste en un método heurístico de búsqueda de mínimos de cualquier función multidimensional. Se basa en fundamentos geométricos, por lo que no requiere el uso de derivadas de la función objetivo. A partir de una estimación inicial, el procedimiento construye un poliedro de $m+1$ vértices, siendo m el número de parámetros del vector θ , donde se

evalúa la función objetivo y se obtienen los nuevos valores que se ajustan mejor. En el caso de dos parámetros, el algoritmo construye un triángulo, en cuyos vértices se evalúa la función objetivo y según sus valores el poliedro se va moviendo y deformando para buscar el óptimo. El método *Simplex* es de gran eficacia para ajustar un gran número de parámetros y se puede aplicar a funciones objetivo sinuosas.

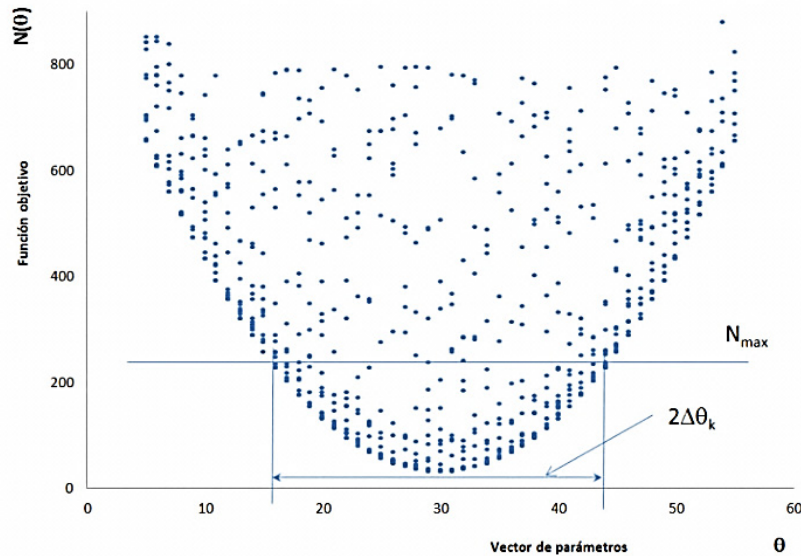


Figura 2.35 – Área de la función objetivo $N(\theta)$ para el caso de un sólo parámetro θ

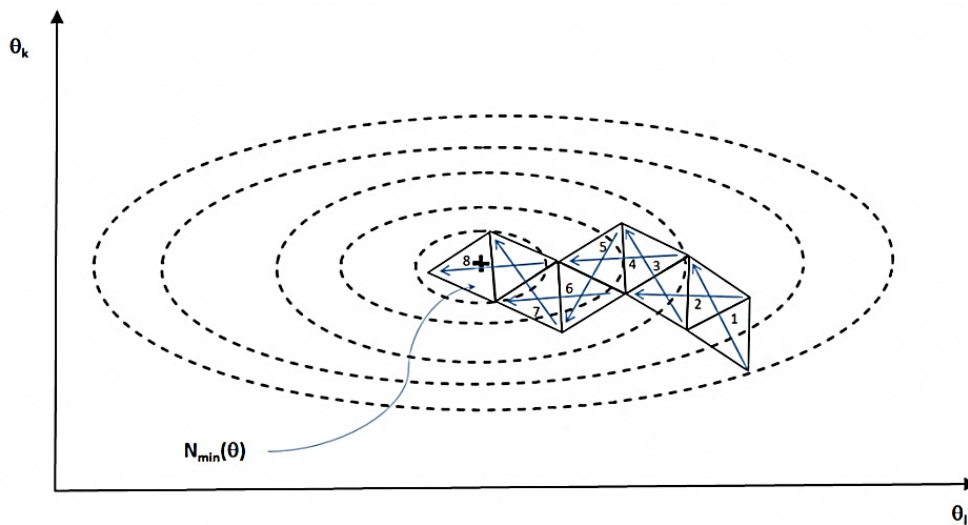


Figura 2.36 – Proyección del área de la función objetivo N para el caso de dos parámetros, θ_k y θ_1 , y procedimiento del método *Simplex* para la obtención del mínimo

Una vez detectado un mínimo, se aplica el método de *Monte Carlo* para generar valores aleatorios que rodean al mínimo, en búsqueda de valores inferiores de la función objetivo. En caso de detectar un nuevo valor mínimo, se vuelve a aplicar el método *Downhill Simplex*. Este mecanismo de búsqueda permite evitar posibles mínimos locales, y obtener con mayor fiabilidad el mínimo global de la función objetivo. En la Figura 2.35 se muestra la superficie correspondiente a la función objetivo $N(\theta)$ para el caso de un modelo de un solo parámetro. En la Figura 2.36 se muestra el caso de un modelo con dos parámetros, mostrándose la proyección de la superficie $N(\theta)$. En línea

discontinua se muestran las curvas con el mismo valor de la función objetivo, o curvas *iso-N*, que rodean el punto correspondiente a los valores óptimos de los parámetros. Si no existe correlación entre los parámetros, las curvas *iso-N* son elipses con los ejes paralelos a los ejes coordenados. La longitud del eje de la elipse, en la dirección de cada parámetro, indica la amplitud del intervalo de confianza con el que se está determinando el valor óptimo de dicho parámetro. A su vez, se muestra cómo trabajaría el algoritmo *Simplex* en la búsqueda del valor mínimo de la función objetivo. La validez de los parámetros θ obtenidos se analiza mediante su intervalo de confianza para una incertidumbre inferior al $\alpha < 5\%$. Las curvas de *iso-N* permiten determinar este intervalo de confianza de una forma muy simple. Primero se determina el valor de la función objetivo, $N_{min}(\theta)$, que contiene al valor mínimo detectado con dicha incertidumbre, para lo que se considera que la media de la función objetivo sigue una distribución *F* de Fischer, y por tanto el valor buscado se puede determinar mediante la ecuación [2.19]^[17].

$$N_{max}(\theta) = N_{min} \cdot \left[1 + F(m, n) \cdot \frac{m}{n - m} \right]^{-1/2} \quad [2.19]$$

Donde:

N_{min} : es el valor mínimo de la función objetivo localizado mediante el algoritmo de búsqueda

m : es el número de parámetros θ que conforman el modelo

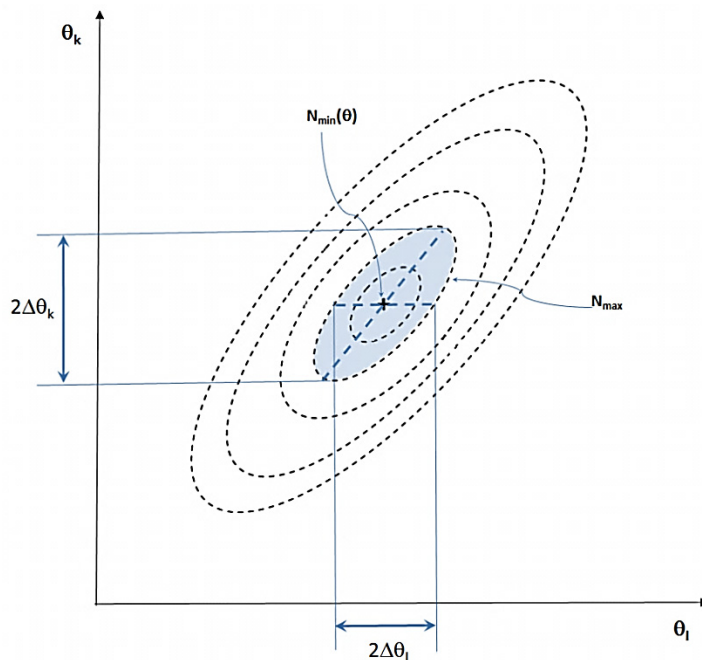


Figura 2.37 – Proyección del área de la función objetivo *N* para el caso de dos parámetros, θ_k y θ_l , correlacionados

El valor del intervalo de confianza para los parámetros, se calcula mediante el método de *Monte Carlo*, generando valores aleatorios de dichos parámetros y seleccionando los que dan lugar a una función objetivo por debajo del valor de N_{max} . La incertidumbre de estimación se reduce cuanto más simple es el modelo, menor valor de m , y se disponga de un mayor número de datos de la función objetivo, mayor valor de n . En este segundo caso, la eficacia de los valores medidos depende de la inercia de la probeta

bajo estudio. Si se está analizando un componente muy inercial con una frecuencia de muestreo muy baja, los valores registrados presentan correlación, de forma que se aplica un valor de n_{eff} , que tiene en cuenta este efecto mediante la ecuación [2.20]. Donde φ es el coeficiente de autocorrelación de los residuos, los cuales se determinan como la diferencia entre el valor medido y el valor calculado por el modelo en cada una de los pasos de iteración, que se determina según la ecuación [2.21]^[18].

$$n_{eff} = n \cdot (1 - |\varphi|) + 1 \quad [2.20]$$

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} [(V(i) - \bar{V}) \cdot (V(i+1) - \bar{V})]}{\sum_{i=1}^n (V(i) - \bar{V})^2} \quad [2.21]$$

Junto al intervalo de confianza, es necesario evaluar la correlación entre parámetros θ , ya que si existe un elevado grado de correlación la variación de uno de los parámetros, θ_r , se ve compensada con la variación del otro, θ_l . La correlación entre parámetros genera una inclinación de los ejes de las curvas *iso-N* respecto a los ejes coordenados del plano de proyección, ver Figura 2.37. Cuanto mayor sea dicha correlación, mayor es la inclinación. Esta situación genera intervalos de confianza elevados para cada parámetro, aunque el valor de la función objetivo N_{min} se determina con elevada certidumbre. La matriz de covarianza de los parámetros del modelo se determinaría mediante la ecuación [2.22].

$$[cov(\theta)] = \frac{2N(\theta)}{n} [N_{p,l}''(\theta)]^{-1} \quad [2.22]$$

Donde la matriz $N_{p,l}''(\theta)$ corresponde con la matriz de derivadas segundas, ó matriz Hessiana [2.23].

$$[N_{p,l}''(\theta)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial \theta_1^2} & \cdots & \frac{\partial N}{\partial \theta_1 \partial \theta_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial N}{\partial \theta_m \partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial N}{\partial \theta_m^2} \end{bmatrix} \quad [2.23]$$

El método *LORD* aprovecha la herramienta estadística de *Monte Carlo*, para calcular la correlación entre parámetros. Para ello se genera una matriz $[\chi]$ formada por vectores de parámetros [2.24], generados aleatoriamente, que cumplen la condición $N(\theta) < N_{max}$. A la matriz $[\chi]$ se la denomina matriz de observaciones.

$$[\chi] = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{r1} & \cdots & \theta_{rm} \end{bmatrix} \quad [2.24]$$

Posteriormente se obtiene la matriz de variación $[M]$ compuesta por los valores medios de cada columna de la matriz $[\chi]$. Por último, se genera la matriz simétrica $[T]$, resultado de multiplicar la matriz de variación por su traspuesta [2.25].

$$[T] = [M]^T \cdot [M] \quad [2.25]$$

La matriz $[K]$ de correlación entre parámetros se obtiene a través de la matriz $[T]$ según la ecuación [2.26].

$$K_{ij} = \frac{k_{ij}}{(k_{ii} \cdot k_{jj})^{1/2}} \quad [2.26]$$

Los elementos de la diagonal $[K]$ son igual a la unidad, y el resto contienen el coeficiente de correlación entre las diferentes parejas de parámetros. Los coeficientes k_{ij} toman el valor 0 cuando no existe correlación entre parámetros, y se acercan a 1 cuanto mayor es la correlación entre los mismos.

2.3.1.2 CTSM

La experiencia de ensayo demuestra que la ecuación de estado [2.12], que describe el comportamiento térmico del sistema, no predice con total exactitud la evolución de los valores medidos. La desviación entre la respuesta del modelo y los valores de entrada se debe generalmente a que:

- El modelo es una aproximación, con ciertas hipótesis simplificativas, como los modelos de parámetros concentrados.
- Pueden existir otras variables que afectan al sistema, y que no se están teniendo en cuenta como entrada, es el caso de la radiación de onda larga, velocidad de viento, etc...
- Los valores registrados experimentalmente están afectados por errores de medida, como es el caso del ruido inherente asociado a cualquier instrumento o sonda de medida.

Para poder contemplar estos efectos, y ajustar de una forma más precisa el modelo a las medidas, se transforma el modelo determinista en un modelo estocástico como se indica en las ecuaciones [2.27].

$$\begin{aligned} \{dT\} &= [A]\{T\}dt + [B]\{U\}dt + d\omega(t) \\ \{Y\} &= [C]\{T\} + [D]\{U\} + e(t) \end{aligned} \quad [2.27]$$

Donde el término aleatorio $\omega(t)$ sigue un proceso Weiner con incrementos independientes de covarianza $\sigma_1^2(t)$, y el término $e(t)$ sigue una distribución normal de ruido blanco con media cero y varianza σ_2 . Se asume la hipótesis que $\omega(t)$ y $e(t)$ son mutuamente independientes y, por tanto, no están correlacionados. En el caso del CTSM, el paso del modelo continuo, en la variable tiempo, al modelo discreto, se realiza resolviendo analíticamente la ecuación [2.27] mediante integración, ver ecuación [2.28]:

$$T(t) = e^{A(t-t_0)}T(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-s)}B \cdot U(s)ds + \int_{t_0}^t e^{A(t-s)}d\omega(s) \quad [2.28]$$

Asumiendo que las excitaciones de entrada al sistema, $U(t)$, son constantes durante el intervalo de muestreo $[t, t+\Delta t]$, el nuevo vector de estado que describe la evolución del sistema sería:

$$\mathbf{T}(t + \tau) = e^{A\tau}\mathbf{T}(t) + \int_0^\tau e^{Ar}\mathbf{B}dr \cdot \mathbf{U}(t) + \int_t^{t+\tau} e^{A(t+\tau-s)}d\omega(s) \quad [2.29]$$

Donde se ha simplificado la notación mediante las sustituciones $\tau=t+\Delta t$ y $r = t+\tau-s$. La ecuación [2.29] se puede plantear de una forma más compacta:

$$\mathbf{T}(t + \tau) = \boldsymbol{\phi}(\tau)\mathbf{T}(t) + \boldsymbol{\Gamma}(\tau)\mathbf{U}(t) + \mathbf{v}(t, \tau) \quad [2.30]$$

donde:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\phi}(\tau) &= e^{A\tau} \\ \boldsymbol{\Gamma}(\tau) &= \int_0^\tau e^{Ar}\mathbf{B}dr \\ \mathbf{v}(t, \tau) &= \int_t^{t+\tau} e^{A(t+\tau-s)}d\omega(s) \end{aligned} \quad [2.31]$$

Al seguir $\omega(t)$ un proceso de Weiner, la función $\mathbf{v}(t, \tau)$ se transforma en una función de ruido blanco que sigue una distribución normal de media cero y covarianza:

$$\boldsymbol{\sigma}_1(\tau) = E[\mathbf{v}(t, \tau)\mathbf{v}(t, \tau)^T] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad [2.32]$$

Como las medidas se realizan con un intervalo de muestreo constante, la escala de tiempo de la ecuación [2.32] se puede expresar de una forma más compacta:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(i + 1) &= \boldsymbol{\phi}\mathbf{T}(i) + \boldsymbol{\Gamma}\mathbf{U}(i) + \mathbf{v}(i) \\ i &\in 0, 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad [2.33]$$

Una vez transformada la ecuación de estado en tiempo continuo a una ecuación discreta, el siguiente paso es definir la función objetivo que permita buscar el vector de parámetros óptimos del modelo. En el caso del CTSM, la función objetivo no se basa en una función residuo definida como la resta entre el cálculo del modelo y los valores medidos, sino que se basa en una función de probabilidad condicional. Esta función de probabilidad se define según la ecuación [2.34].

$$L(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{Y}(n)) = p(\mathbf{Y}(n)|\boldsymbol{\theta}) = \left(\prod_{i=1}^n p(\mathbf{Y}(i)|\mathbf{Y}(i-1), \boldsymbol{\theta}) \right) p(\mathbf{Y}(0)|\boldsymbol{\theta}) \quad [2.34]$$

La función objetivo de probabilidad se obtiene, por tanto, de aplicar de forma recursiva la regla básica de probabilidad condicional $P(A \cap B) = P(A|B)P(B)$, tantas veces como datos medidos se disponen, n , formando así, una función de densidad condicional, para un vector concreto $\boldsymbol{\theta}$. En este caso, el vector óptimo de parámetros se busca como aquel vector que genera una respuesta del sistema que, con mayor probabilidad, se ajusta a los valores medidos. Como los dos términos aleatorios añadidos $\mathbf{v}(t)$ y $\mathbf{e}(t)$ siguen una distribución normal, la función de densidad condicional sigue también una distribución normal, que puede caracterizarse directamente por su valor medio y su varianza. Para

hacer más sencillo el proceso de maximizado, se trabaja sobre el logaritmo de la función objetivo, ecuación [2.36].

$$[\boldsymbol{\theta}]_{opt} = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} \{L(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{Y}(n))\} \quad [2.35]$$

$$l(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{Y}(n)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [\boldsymbol{\varepsilon}(i)^T \mathbf{S}(i|i-1)^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}(i) - \log(\det \mathbf{S}(i|i-1))] + C \quad [2.36]$$

Donde se ha introducido el término de media condicional:

$$\hat{\mathbf{Y}}(i|i-1) = E(\mathbf{Y}(i)|\mathbf{Y}(i-1), \boldsymbol{\theta}) \quad [2.37]$$

Y varianza condicional:

$$\mathbf{S}(i|i-1) = V(\mathbf{Y}(i)|\mathbf{Y}(i-1), \boldsymbol{\theta}) \quad [2.38]$$

Además, se evalúa el error en cada intervalo mediante:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(i) = \mathbf{Y}(i) - \hat{\mathbf{Y}}(i|i-1) \quad [2.39]$$

Este método de estimación del error se denomina *PEM (Prediction Error Method)*. Este método es más avanzado que el *OEM*, ya que permite tener en cuenta las variabilidades estocásticas del modelo y de las funciones de excitación, y aporta nuevas herramientas para el análisis y validación del modelo final obtenido, como es el análisis de correlación de residuos. Para calcular la media y la varianza condicional de forma iterativa, se aplica un filtro de Kalman, que calcula los valores del vector de estado en cada intervalo. Una vez evaluada la función objetivo de máxima probabilidad, se calcula la varianza de los parámetros del vector óptimo, $\boldsymbol{\theta}_{opt}$, como:

$$V(\boldsymbol{\theta}) = - \left[\frac{\partial^2 \log L}{\partial \boldsymbol{\theta}^2} \right]^{-1} \quad [2.40]$$

Como se puede observar, el enfoque de las dos herramientas de trabajo, *LORD* y *CTSM*, es muy diferente, aunque el modelo de partida es el mismo. Su validez y capacidad de aplicación han sido ampliamente evaluadas a lo largo de los diferentes *SIC (System Identification Competition)*^[19], que ha promovido la red *DYNASTE*. La experiencia adquirida en el uso de los dos métodos de identificación de parámetros ha permitido aprovechar las mejores propiedades de cada herramienta, como es el caso de la robustez del mecanismo *Downhill Simplex-Monte Carlo* que aplica el *LORD*, y la gran potencialidad de análisis de calidad de los resultados que permite el método *PEM* que aplica el *CTSM*. De hecho, la última versión de *LORD* incluye un módulo estadístico que aplica el *PEM* para la estimación de parámetros. Para la obtención de los modelos que componen esta tesis se aplican ambas herramientas de forma paralela. Existen herramientas más generales para la identificación de parámetros, como la *toolbox* de *Matlab*, que también se han empleado en la presente tesis. Una vez analizados los métodos de identificación de parámetros se pasa, en el siguiente apartado, a definir los modelos de trabajo que permiten describir el comportamiento de la celda de ensayos *EGUZKI*.

2.3.2 Modelos de la celda

La sala de ensayos se ha diseñado con el objetivo de facilitar su modelado. Cuanto más sencillo sea representar el comportamiento de la envolvente de la celda, más potencial de identificación de parámetros se podrá aplicar a la caracterización de la muestra. La situación ideal sería disponer de un modelo de celda tan sencillo como el de un solo nodo. Para alcanzar este objetivo, el volumen de aire de la sala de ensayos debe presentar una temperatura homogénea, y el flujo total de calor intercambiado en el mismo debe ser medido con precisión en cada instante. El primer punto, la homogeneidad de temperaturas, se ha verificado, gracias a la medida de los siete sensores de temperatura y a la adecuada mezcla del volumen de aire realizado por el ventilador tangencial, *apartado 2.2.3*. El segundo punto, que hace referencia a la medida precisa de todo el flujo de calor intercambiado, se debe verificar mediante el planteamiento y análisis de los diferentes modelos que pueden representar e interpretar el proceso físico de transmisión de calor que se produce en la sala de ensayos.

En la Figura 2.38 se muestra el conjunto de modelos que se estudian para evaluar la celda *EGUZKI*, partiendo del modelo más sencillo de un solo nodo, hasta llegar al modelo más complejo evaluado, que representa, por separado, el comportamiento de las partes de la envolvente que presentan un comportamiento específico. En el modelo 1 se estudia el balance de energía tomando como volumen de control el ambiente de la sala de ensayos juntos con la superficie de *tiles*. En el modelo 2 se amplía el balance a la envolvente completa, tomando la misma temperatura exterior para todas las superficies y despreciando el efecto de la radiación solar sobre el muro de calibración. El modelo 2 es una aproximación adecuada para obtener unos valores previos orientativos de las propiedades de la envolvente de la sala de ensayos y compararlas con las estimadas por cálculo en el capítulo anterior. Los modelos 3 y 4 consisten en centrar el esfuerzo de identificación al muro de calibración y a la envolvente de la sala de ensayos, respectivamente. En el modelo 3 se emplea la temperatura superficial del muro de calibración, lo que permite considerar el efecto de la radiación solar sobre el mismo. En el caso del modelo 4 se emplea la temperatura de aire exterior, la cual se considera igual para todas las superficies. Estos dos modelos sirven de estudio previo al modelo 5, en el cual se analiza de forma simultánea la transmisión de calor a través de envolvente y muestra. Por último, el modelo 6 diferencia la transmisión de calor de la superficie norte de la sala de ensayo que no está sometida a la temperatura exterior, sino a la temperatura de la sala de servicio. Si se toma como ejemplo el modelo 5, y se plantean los balances de energía en cada nodo, según se ha indicado en la ecuación [2.11], se obtendría el conjunto de ecuaciones [2.41].

$$\begin{aligned}
 C_i \frac{dT_i}{dt} &= P + (T_{s,c} - T_i)H_1 + (T_{s,e} - T_i)H_1 \\
 C_{s,c} \frac{dT_{s,c}}{dt} &= (T_i - T_{s,c})H_1 + (T_1 - T_{s,c})H_2 \\
 C_1 \frac{dT_1}{dt} &= (T_{s,c} - T_1)H_2 + (T_{c,e} - T_1)H_5 \\
 C_{s,e} \frac{dT_{s,e}}{dt} &= (T_i - T_{s,e})H_4 + (T_2 - T_{s,e})H_2 \\
 C_2 \frac{dT_2}{dt} &= (T_{s,e} - T_2)H_5 + (T_e - T_2)H_6
 \end{aligned}
 \tag{2.41}$$

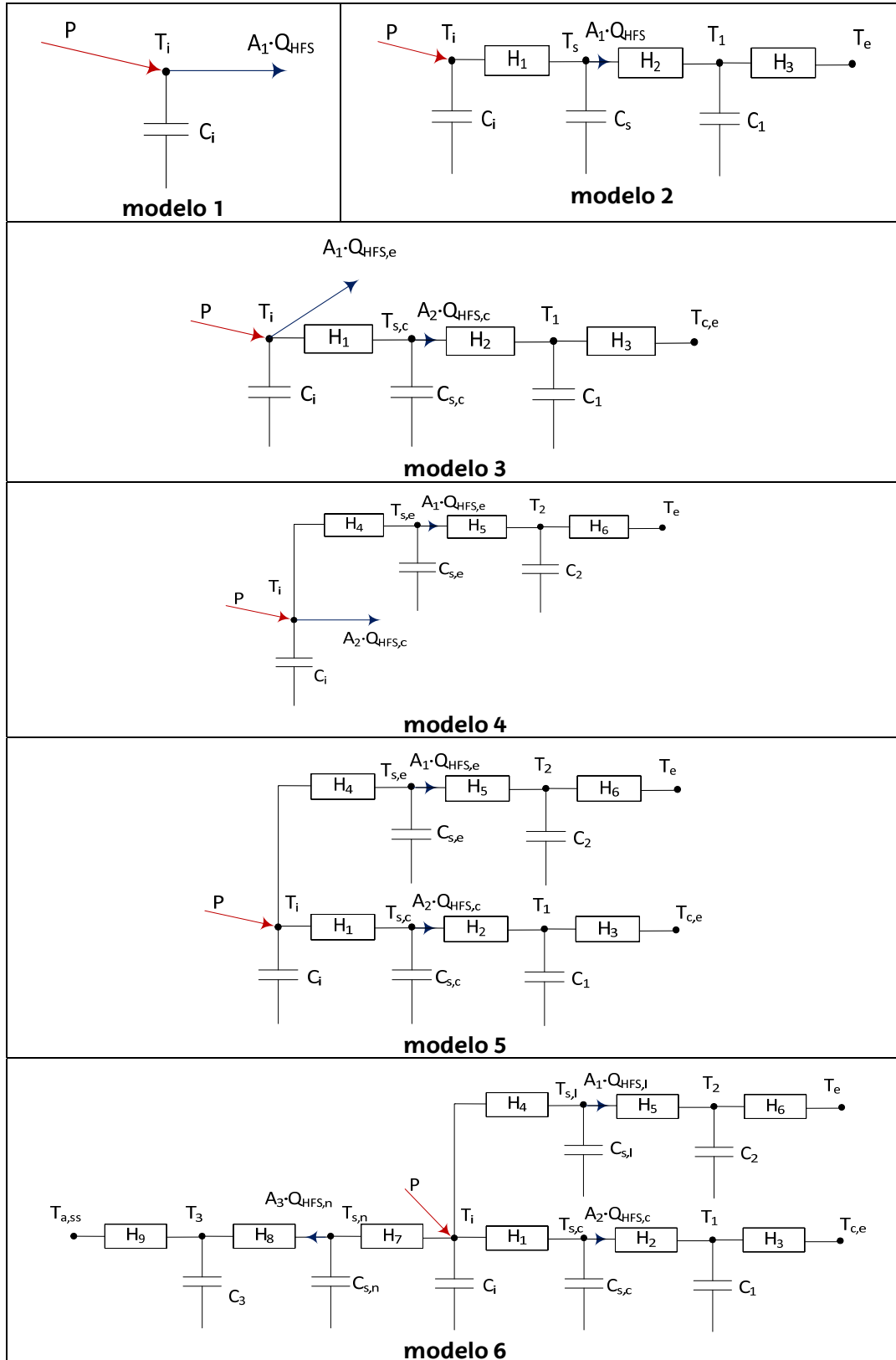


Figura 2.38 – Modelos de representación del comportamiento térmico de la celda

Las variables de entrada al sistema, o excitaciones del modelo, son la potencia de calefacción de la celda, la temperatura superficial exterior del muro de calibración, y la temperatura ambiental, P , $T_{c,e}$ y T_e , respectivamente. Las variables medidas, y que se emplean para definir la función objetivo, son la temperatura del aire interior de la celda, T_i , y los flujos de calor medidos por las *tiles*, correspondientes a la superficie de la envolvente, $Q_{HFS,e}$, y del muro de calibración, $Q_{HFS,c}$. Aplicando la nomenclatura matricial, definida en la ecuación [2.12], el sistema lineal que representa el modelo de la celda es el indicado en las ecuaciones [2.42] y [2.43]. El modelo se resuelve aplicando las herramientas de identificación de parámetros planteadas anteriormente, para las tres rutinas de ensayo realizadas, *PULSO*, *PRBS* y *ROLBS*. A continuación se muestran, como ejemplo, los resultados obtenidos para el caso de la rutina *PRBS*, ver Tabla 2.7. Los valores de transmitancia están indicados en unidades de [W/K], los valores de capacidad térmica en unidades de [MJ/K], y las aperturas de los flujos de calor son variables adimensionales. Junto al valor de cada variable se indica la incertidumbre de la misma en el proceso de identificación, la cual se obtiene mediante la desviación estándar^[12].

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \\ dT_{s,e} \\ dT_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1+H_4)}{C_i} & \frac{H_1}{C_i} & 0 & \frac{H_4}{C_i} & 0 \\ \frac{H_1}{C_{s,c}} & \frac{-(H_1+H_2)}{C_{s,c}} & \frac{H_2}{C_{s,c}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & \frac{-(H_2+H_3)}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{H_4}{C_{s,e}} & 0 & 0 & \frac{-(H_4+H_5)}{C_{s,e}} & \frac{H_5}{C_{s,e}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_2} & \frac{-(H_5+H_6)}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,e} \\ T_2 \end{bmatrix} dt +$$

[2.42]

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_6}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \sigma_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{s,c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{s,e} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_2 \end{bmatrix} dW$$

$$\begin{bmatrix} T_{i,m} \\ T_{s,c,m} \\ T_{s,e,m} \\ Q_{HFS,e} \\ Q_{HFS,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{A_1} & \frac{-H_5}{A_1} \\ 0 & \frac{H_2}{A_2} & \frac{-H_2}{A_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i(t) \\ T_{s,c}(t) \\ T_1(t) \\ T_{s,e}(t) \\ T_2(t) \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P(t) \\ T_{c,e}(t) \\ T_e(t) \end{bmatrix} +$$

[2.43]

$$\begin{bmatrix} s_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{s,c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{s,e} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_2 \end{bmatrix} de(t)$$

Como se puede apreciar en las tres primeras columnas de la tabla, el rango de estudio de los parámetros es amplio, rodeando el valor inicial. De esta forma se asegura una mayor validez de los resultados, al examinar un espacio muestral representativo, de forma que el mínimo obtenido de residuos, o el máximo de probabilidades, son los

valores buscados y no se está determinando mínimos o máximos locales. Las tres últimas columnas recogen tres pruebas estadísticas que permiten evaluar la calidad de los valores estimados. El primer estadístico es una prueba t-score de la varianza. Valores inferiores a 0,05 implicarían que el parámetro correspondiente presenta un efecto nulo o despreciable en el modelo. El estadístico $dF/dPar$ se obtiene de la función objetivo, y si no toma valores próximos a cero, indica que el valor encontrado no corresponde con el valor óptimo, y se está alcanzando un óptimo local. El estadístico $dPen/dPar$ permite evaluar si el intervalo definido es correcto, valores alejados del cero indicarían que puede existir un valor más óptimo del parámetro fuera del rango definido, y por tanto es necesario ampliar el mismo. Una vez verificado que el proceso de identificación de parámetros se ha llevado a cabo correctamente, se pasa a analizar los valores de los parámetros obtenidos.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H1	10	100	300	80.42	4.57	314.8	-0,019	0.0002
H2	0.1	3	200	9.885	0.231	42.8	0,001	0.0000
H3	0.5	3	200	1.161	0.003	212.5	0,000	-0.0027
H4	100	300	600	459.5	1.5	307.8	0,020	0.0014
H5	1	10	200	187.7	2.1	89.3	-0,002	0.0001
H6	1	10	200	5.974	0.159	44.3	0,001	0.0000
Ci	0.0006	0.06	0.12	0.010	0.001	41.8	0,001	0.0000
Cs,c	0.006	0.3	0.6	0.256	0.006	45.2	0,000	0.0000
C1	0.006	0.3	0.6	0.293	0.003	91.3	0,000	-0.0004
Cs,e	0.006	0.3	0.9	0.450	0.005	94.9	-0,001	0.0004
C2	0.6	3	6	5.077	0.009	226.5	0,000	-0.0049
A1	0.5	0.8	1.5	0.995	0.002	422.6	-0,011	0.0004
A2	0.5	0.8	1.5	1.042	0.001	445.4	-0,001	-0.0155

Tabla 2.7 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 5

	H1	H4	Ci	Cs,c	H2	C1	H3	Cs,e	H5	C2	H6	A1	A2
H1	1												
H4	0.23	1											
Ci	0.14	-0.04	1										
Cs,c	-0.04	0.04	-0.02	1									
H2	-0.23	-0.04	-0.03	0.13	1								
C1	-0.05	0.02	0.00	0.01	0.05	1							
H3	-0.36	-0.06	0.00	0.02	0.04	0.01	1						
Cs,e	0.13	-0.01	-0.01	0.00	0.03	0.01	0.01	1					
H5	0.27	0.22	0.03	0.09	-0.22	-0.03	-0.01	-0.06	1				
C2	-0.14	0.02	-0.02	0.04	0.30	0.04	0.04	0.03	-0.23	1			
H6	0.02	0.29	-0.01	0.10	0.14	0.02	0.03	0.01	-0.23	0.08	1		
A1	0.27	0.27	-0.04	-0.26	-0.25	-0.03	0.02	-0.28	0.22	-0.12	0.03	1	
A2	-0.06	-0.02	-0.02	0.06	0.20	0.03	0.03	0.04	-0.16	0.16	0.09	-0.28	1

Tabla 2.8 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 5

Los valores de H_1 y H_4 corresponden a las conductancias superficiales interiores de la sala de ensayos, tanto del muro de calibración, como de la envolvente,

respectivamente. Teniendo en cuenta que la superficie del muro de calibración es de $7.13 \text{ [m}^2\text{]}$, se obtendría un valor del coeficiente de convección de $11.3 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Para el caso de la envolvente, que presenta una superficie interior de $53.12 \text{ [m}^2\text{]}$, el coeficiente de convección obtenido sería de $8.6 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Estos valores de los coeficientes superficiales son superiores a los que se generan en condiciones de convección natural, que toma valores del orden de $7.5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Esta diferencia era de esperar, al existir una agitación mecánica mediante el ventilador tangencial, y la amplitud de la misma, concuerda con las bajas velocidades de giro impuestas mediante un regulador de potencia. El mayor valor del coeficiente de convección sobre la superficie del muro de calibración también tiene sentido con respecto a las condiciones físicas del ensayo. La salida de aire del cajón que contiene el calefactor y el ventilador, está enfocado hacia dicha superficie y, aunque está lo más centrado posible de la sala de ensayos, para poder dejar recorrido a la puerta de acceso para su apertura, está más próximo a la cara sur de la sala de ensayos. Los valores de H_2 y H_3 definen la transmitancia del muro de calibración, obteniéndose un valor de $U_{cal} = 1.038 \text{ [W/K]}$. El valor esperado, para condiciones de flujo unidimensional, es de $U_{cal} = 0.576 \text{ [W/K]}$. Esta diferencia implica que está contemplando los efectos de borde, que exigen un estudio particular que se realiza posteriormente.

Además de evaluar el resultado total de transmitancia, es necesario verificar que los dos parámetros no presentan correlación, ya que este caso es muy susceptible de generar esta situación. Puede existir un gran abanico de parejas de valores para las conductancias parciales que generen un mismo valor de transmitancia total. En la Tabla 2.8 se recogen los coeficientes de autocorrelación entre parámetros. Para el caso de los parámetros H_2 y H_3 , el coeficiente toma el valor de 0.04, próximo a cero, y por tanto, no existe autocorrelación entre los mismos y el proceso de identificación es válido. El estudio de los coeficientes de correlación debe realizarse para todo el conjunto de parámetros del modelo, y evaluar con detalle aquellos casos en los que se presenten coeficientes altos. Como la sección del muro de calibración es simétrica, cabría esperar un reparto de conductancias equilibrado y, por tanto, H_2 y H_3 deberían presentar valores idénticos, o por lo menos, próximos. En cambio, el valor de H_3 contiene el 89.5% de la resistencia total del muro. La igualdad de conductancias se puede imponer en el modelo, pero una característica especial de los métodos de identificación, es que el valor total presenta mejores resultados si se dejan libres los parámetros que lo configuran^[3]. Esta situación se analiza con mayor detenimiento más adelante. De forma similar, las conductancias H_5 y H_6 definen la transmitancia de la envolvente de la sala de ensayos, dando un valor de $U_{env} = 5.790 \text{ [W/K]}$. En el apartado 2.1.2.1 del capítulo anterior, se realiza una estimación de dicha transmitancia, en base a las conductividades medidas de los diferentes componentes que configuran la estructura, obteniéndose como resultado del cálculo el valor de $U_{env} = 5.973 \text{ [W/K]}$. Por tanto, el valor obtenido de la identificación de parámetros concuerda con lo esperado.

Analizadas las transmitancias del modelo, se pasa a evaluar los valores de las capacidades térmicas obtenidas. El valor de C_i corresponde con la capacidad térmica del aire interior de la sala de ensayos, junto con el resto de elementos presentes en la misma, como el cajón que contiene el sistema de calefacción y el ventilador, la estructura de la puerta de acceso, cajas de conexión de la instrumentación, etc... Tomando las propiedades estándar del aire, sólo la capacidad térmica del volumen de la sala de ensayos presentaría un valor de $C_{aire} = 0.045 \text{ [MJ/K]}$, al cual hay que sumar el resto de componentes indicados anteriormente. Por tanto, en este caso el valor estimado por el proceso de identificación de parámetros es sensiblemente inferior al esperado. Las capacidades térmicas $C_{s,c}$ y $C_{s,e}$ representan la capacidad de las *tilas* que recubren la superficie interior de la sala de ensayos. Se puede realizar una estimación aproximada de dicha capacidad teniendo en cuenta que el espesor de las placas de

aluminio es de $e_{tiles} = 4$ [mm], y tomando unos valores de $\rho_{alum} = 2700$ [kg/m³] y $c_p = 900$ [J/kgK], se obtiene una capacidad térmica total de $C_{tiles} = 0.650$ [MJ/K]. Teniendo en cuenta el reparto de superficies entre el muro de calibración y la envolvente, los valores esperados serían $C_{s,c} = 0.070$ [MJ/K] y $C_{s,e} = 0.578$ [MJ/K]. Se puede apreciar cómo en el caso de la capacidad térmica de la superficie del muro de calibración, el modelo de identificación de parámetros obtiene un valor muy superior. Teniendo en cuenta lo comentado anteriormente en relación a la capacidad térmica del volumen interior, correspondiente a C_i , se deduce que el valor estimado de $C_{s,c}$ incluye parte de la capacidad del volumen interior. En el caso del valor de $C_{s,e}$, el resultado obtenido concuerda con el esperado.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T10	10	20	40	18.44	0.19	94.9	-0.0001	-0.0002
T20	10	20	40	16.51	0.11	148.2	-0.0001	-0.0003
T30	10	20	40	16.84	0.14	123.2	0	-0.0001
T40	10	20	40	19.53	0.08	260.1	-0.0003	0
T50	10	20	40	19.67	0.10	199.4	0.0000	0.0003
sig11	0	0.01	1	0.009	0.000	34.4	-0.0001	0.0000
sig22	0	0.01	1	0.081	0.002	39.4	-0.0006	0.0000
sig33	0	0.01	1	0.244	0.005	51.6	0.0016	0.0000
sig44	0	0.01	1	0.013	0.000	44.1	-0.0005	0.0000
sig55	0	0.01	1	0.037	0.000	82.6	-0.0002	0.0000
s11	0	0.01	1	0.000	0.000	22.9	-0.0072	0.0000
s22	0	0.01	1	0.175	0.004	40.9	0.0003	0.0000
s33	0	0.01	1	0.000	0.000	20.7	0.0075	0.0000
s44	0	0.01	1	0.001	0.000	30.6	0.061	0.0000
s55	0	0.01	1	0.006	0.000	34.3	0.0025	0.0000

Tabla 2.9 – Resultados complementarios del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 5

La situación de acoplamiento de parámetros, es un caso usual en los procesos de identificación. Para evitarlos, es necesario disponer de un periodo de ensayo suficientemente amplio como para poder realizar el proceso de identificación en diferentes intervalos y, poder evaluar así, la consistencia de los valores obtenidos. También influye la rutina de ensayo aplicada, de ahí el desarrollo de las rutinas PRBS y ROLBS. El estudio aplicado a ambas, sumando el ensayo PULSO, permite disponer de mayor capacidad para obtener resultados más precisos de los parámetros, como se verá más adelante. Junto con los parámetros del modelo se deben analizar otros valores complementarios, que amplían el proceso de evaluación del modelo. Estos parámetros son los valores iniciales de las temperaturas en cada nodo, y el valor medio de las funciones de Wiener de las temperaturas en los nodos, sig_{ii} , y el valor medio de la distribución normal, s_{jj} , correspondiente al error estimado en las funciones de excitación medidas durante el ensayo, ver Tabla 2.9.

En este caso, los valores iniciales de las temperaturas, estimados por el modelo, se ajustan a los valores medidos experimentalmente. En cuanto a la componente aleatoria evaluada en cada nodo, no supera el valor de 0.25°C, así como el error estimado en las funciones de excitación, que alcanza el valor máximo de 0.18°C, correspondiente a la medida de la temperatura superficial. El valor del error está por debajo de la incertidumbre de medida de las sondas de temperatura y, por otro lado, es razonable que dicho error máximo se dé en la medida de la temperatura superficial de las *tiles*, ya que este parámetro es el más complejo de medir en el ensayo. Tras analizar

los parámetros, para finalizar el proceso de validación del modelo, es necesario realizar un estudio de ruido blanco aplicado a los residuos. Un modelo que reproduzca adecuadamente el comportamiento de las variables medidas debe presentar un patrón de ruido aleatorio en los residuos, obtenidos mediante la diferencia entre las medidas y los valores calculados. En el caso de la temperatura interior de la sala de ensayos, T_i , una de las principales variables del proceso, en la Figura 2.39 se puede observar la comparación entre los valores medidos y los calculados. Debido a que la diferencia entre ambas curvas es pequeña, en Figura 2.40 se muestra un tramo con mayor detalle, representado por una zona sombreada en la figura anterior. Se puede apreciar que el modelo estocástico, obtenido mediante identificación de parámetros, es capaz de predecir la evolución de la temperatura con gran precisión.

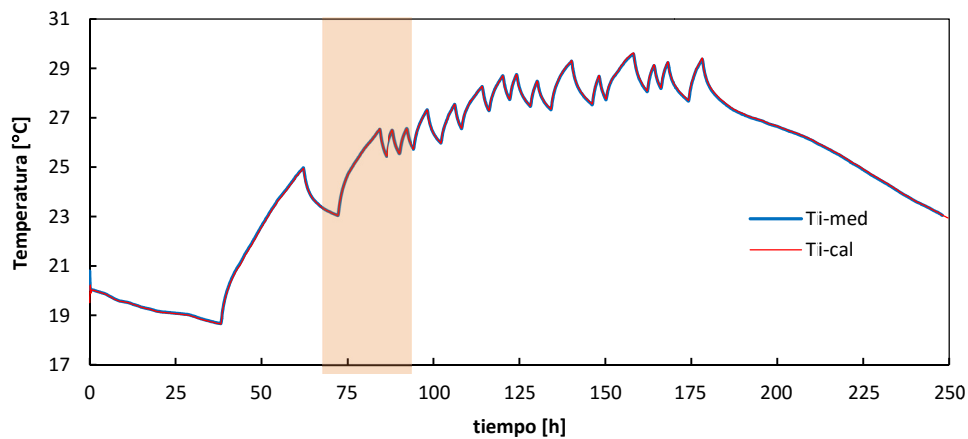


Figura 2.39 – Comparación entre la temperatura de aire interior medida durante el ensayo y el modelo

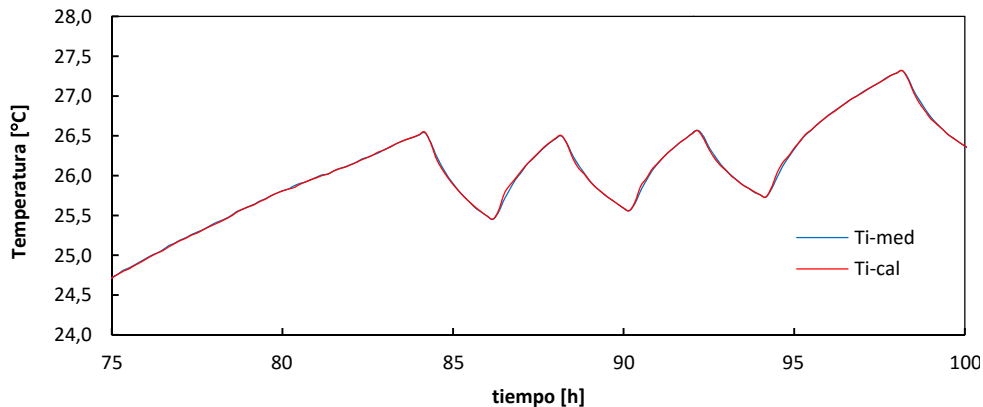


Figura 2.40 – Temperatura interior del modelo frente a los valores medidos para un tramo de la excitación PRBS

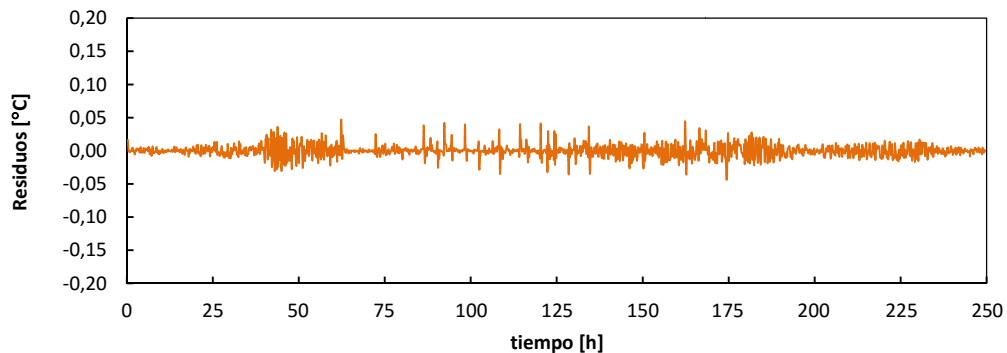


Figura 2.41 – Residuos modelo 5 para la temperatura interior en la excitación PRBS

En la figura 2.41 se muestran los residuos calculados, en los que se aprecia un comportamiento de ruido, con valores que rodean al cero, con un patrón aleatorio. Y por otro lado, el valor absoluto de dichos residuos es muy inferior a la incertidumbre de medida de las propias sondas de temperatura. Para poder verificar que los residuos presentan un patrón aleatorio, correspondiente al ruido blanco de la instrumentación de medida, se evalúa, entre la gran variedad de herramientas estadísticas disponibles, la función de autocorrelación y el periodograma integrado. Los coeficientes de la función de autocorrelación con retardo a_k , calculados según se indica en la ecuación [2.44], permiten cuantificar la correlación entre observaciones k periodos de tiempo separados. Valores positivos de los coeficientes a_k implican que un valor positivo en el residuo r_t genera una sucesión de valores positivos, ó negativos. El análisis de los coeficientes a_k permite determinar la existencia de ciclos y tendencias en los residuos, relaciones no lineales, o la omisión de variables relevantes que no se han introducido en el modelo.

$$a_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (r_t - \bar{r})(r_{t+k} - \bar{r})}{\sum_{t=1}^{n-k} (r_t - \bar{r})^2} \quad [2.44]$$

En la Figura 2.42 se muestra el análisis de autocorrelación para los residuos en la T_i en el modelo 5. Se omite el coeficiente a_0 , que siempre toma el valor unidad, y se evalúa hasta un valor máximo de 50h de retraso. Se puede apreciar que los coeficientes a_k toman rápidamente valores pequeños, y se alternan alrededor del valor nulo, sin un patrón concreto. Este comportamiento indica que no existe ninguno de los componentes indicados anteriormente, y por tanto, el modelo está representando correctamente el comportamiento de la celda.

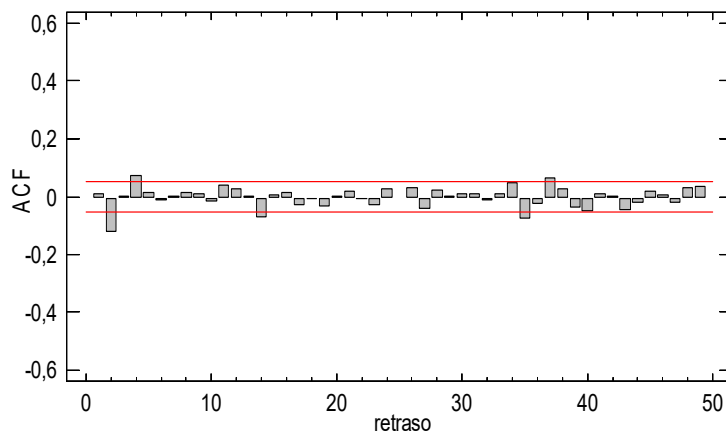


Figura 2.42 – Coeficientes de correlación para los residuos de T_i en el modelo 5, para la excitación PRBS

El margen de significancia estadística de los coeficientes a_k se define mediante dos líneas de color rojo. Para definir estos límites se emplea el error estándar de determinación de dichos coeficientes. Si se tiene en cuenta que un coeficiente a_k debe tomar el valor cero para retrasos iguales a k y superiores se puede determinar el error estándar como indica la ecuación [2.45].

$$e_s[a_k] = \left(\frac{1}{n} \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{k-1} a_i^2 \right\} \right)^{1/2} \quad [2.45]$$

Aplicando el estadístico del valor crítico de la distribución normal, se puede definir los límites de probabilidad alrededor del cero con una certidumbre del $100(1-\alpha)\%$ mediante la expresión [2.46].

$$0 \pm z_{\alpha/2} e_s [a_k] \quad [2.46]$$

Para el estudio se toma $\alpha=0.05$, de forma que la significancia estadística se determina con una certidumbre del 95%. La función de autocorrelación permite evaluar el comportamiento de los residuos en el dominio del tiempo. Pero también es de gran interés realizar el análisis en el dominio de la frecuencia. Este estudio se puede realizar de una forma muy directa mediante el periodograma integrado. Para ello se descompone la serie discreta en el dominio del tiempo en las frecuencias de Fourier mediante la suma de funciones armónicas según la ecuación [2.47]. La i -ésima frecuencia de Fourier se determina según [2.48] para $i = 0,1,\dots,n/2$, si n es par, o $i = 0,1,\dots,(n-1)/2$, si n es impar.

$$a_i \cos(2\pi f_i t) + b_i \sin(2\pi f_i t) \quad [2.47]$$

$$f_i = \frac{1}{n} \quad [2.48]$$

La participación de cada una de las frecuencias en la serie, se determina mediante la expresión [2.49]. Este valor se escala de forma que la suma de todas las componentes de las frecuencias de Fourier sea igual a la suma de las desviaciones cuadráticas de los residuos respecto a su media. De forma, que en verdad, lo que se está realizando es un análisis de varianza de las frecuencias.

$$I(f_i) = \frac{n}{2} (a_i^2 + b_i^2) \quad [2.49]$$

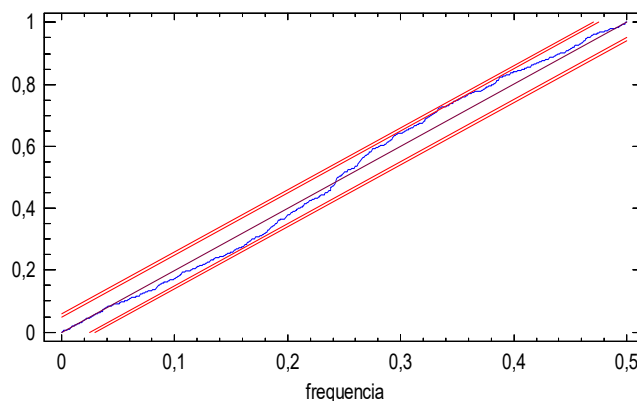


Figura 2.43 – Periodograma integrado para los residuos de T_i en el modelo 5 para la excitación PRBS

A esta representación de componentes se le denomina periodograma. Si además se normaliza a la unidad, dividiendo cada componente por la suma total de componentes, se obtiene el periodograma integrado. En la Figura 2.43 se muestra el resultado obtenido para el estudio de residuos del modelo 5, que se está evaluando. Si una serie de tiempo es puramente aleatoria, las amplitudes relativas acumuladas para cada frecuencia formarían la recta diagonal. Para determinar la significancia estadística, en este caso, se emplean los intervalos de confianza de *Kolmogorov-Smirnov*, que se muestran en la gráfica mediante líneas rojas, para una certidumbre del 95% y 99%, interior y exterior, respectivamente. En el periodograma del modelo 5 se aprecian

desviaciones marcadas respecto de la línea diagonal, esto indica la presencia de autocorrelación, pero al no superar las bandas de significancia, dichas correlaciones son débiles, y se pueden despreciar. Como se ha podido observar de los gráficos de autocorrelación de residuos, y del periodograma integrado, el modelo 5 obtenido reproduce adecuadamente el comportamiento de la T_i de la celda, dando un patrón de residuos de módulo reducido y de carácter aleatorio. Este estudio debe realizarse de igual forma para el conjunto de funciones objetivo empleadas en el modelo. A continuación se desarrolla el análisis para los modelos planteados en el estudio de la celda. En la Tabla 2.10 se recogen los resultados completos de los parámetros de la celda, obtenidos mediante el estudio de identificación. En sombreado se indican los valores obtenidos mediante la rutina *PRBS*, que se analizan con más detalle a continuación. El estudio completo se recoge en el Anexo A.

	C_i	C_s	$C_{s,c}$	$C_{s,e}$	C_{cel}	C_c	C_e	H_i	$H_{i,c}$	$H_{i,e}$	H_c	H_e	A_1	A_2	A_3
modelo 1	0,651												1,075		
	0,557												1,060		
	0,595												1,046		
modelo 2	0,028	0,685			5,434			530,4						1,071	
	0,324	0,355			5,329			446,6						1,042	
	0,009	0,737			5,648			473,6						1,032	
modelo 3			0,055	0,574		0,542		62,8			1,091		1,052	1,118	
			0,144	0,583		0,259		57,9			0,945		1,072	1,183	
			0,129	0,598		0,232		45,3			0,841		1,017	1,104	
modelo 4			0,183	0,853			3,973			334,6		5,379	1,038	1,061	
			0,175	0,405			4,992			323,6		5,135	0,983	1,331	
			0,195	0,446			4,555			234,6		3,641	1,066	1,098	
modelo 5	0,024	0,677	0,034	0,643	4,294	0,388	3,905	532,9	82,4	396,1	1,083	6,005	1,033	1,181	
	0,010	0,706	0,256	0,450	5,369	0,293	5,077	539,9	80,4	459,5	1,039	5,790	0,995	1,042	
	0,028	0,823	0,247	0,576	6,203	0,335	5,868	475,0	72,0	379,3	0,948	5,359	0,943	1,161	
modelo 6	0,022	0,750	0,282	0,470	5,871	0,631	5,240	499,1	86,1	346,5	0,906	5,977	1,035	1,176	1,057
	0,094	0,639	0,169	0,564	5,619	0,398	5,220	457,4	82,8	374,6	1,041	5,021	1,083	1,136	1,036
	0,026	0,798	0,193	0,497	5,623	0,260	5,364	364,6	62,2	311,4	0,928	5,821	0,938	1,096	1,084

Tabla 2.10 – Resultados completos del proceso de identificación de parámetros en cada modelo, de arriba abajo, se indica el valor obtenido en el análisis de las rutinas *PULSO*, *PRBS* y *ROLBS*, respectivamente

El primer modelo planteado tiene gran importancia, ya que en él se representa la celda como un único nodo, ligado a la temperatura de aire de la sala de ensayos, con una capacidad térmica asociada. Como ya se ha comentado, el diseño de la celda está orientado para conseguir este modelo simple. Para ello, la envolvente de la sala de ensayos es ligera y con elevado aislamiento. Los puentes térmicos presentan un efecto acotado, y su comportamiento está correctamente caracterizado y medido durante el ensayo. Las condiciones del ambiente interior son muy homogéneas en todo el volumen de la sala de ensayo. Y el resto de componentes que participan en el intercambio de calor, como las infiltraciones, conducción a través de los cables de transmisión de señales de los sensores, y otros efectos no tenidos en cuenta, son despreciables frente a los flujos medidos. Por todo ello, el comportamiento térmico de la sala de ensayos debería poder representarse mediante un único nodo asociado a la temperatura interior de aire, en el que se introduce la potencia de ensayo. Como se puede observar en la Figura 2.44, estas características se verifican. Los residuos obtenidos de comparar la temperatura medida frente a la predicha por el modelo 1 son inferiores a la propia resolución de las sondas de temperatura. Al analizar los residuos, no se obtiene un patrón perfecto de ruido blanco, pero los coeficientes de autocorrelación toman valores pequeños, cercanos a los límites de relevancia estadística, y el periodograma integrado se encuentra entre las bandas de aceptación

en su gran mayoría. Se detecta una desviación en las frecuencias bajas, pero de amplitud reducida, por lo que se puede considerar despreciable.

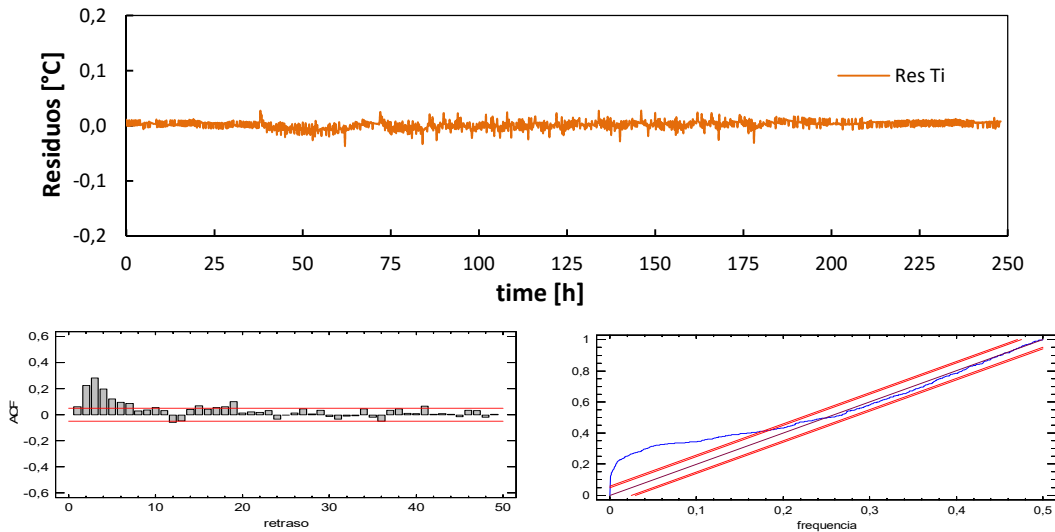


Figura 2.44 – Análisis de residuos en el modelo 1 para la excitación PRBS

Analizando los valores obtenidos para la capacidad térmica de la sala de ensayos, se puede ver que dicho valor supera la capacidad térmica esperada únicamente para el ambiente interior. Debido a que la envolvente es muy aislante, y los flujos de calor intercambiados son pequeños, la temperatura de la superficie de las *tilas* está muy próxima a la del aire, lo que da lugar a un comportamiento equivalente de la sala de ensayos en el que la inercia térmica de las *tilas* se suma a la propia del aire. En la página 67 se ha realizado una estimación de la capacidad esperada para la superficie de *tilas*, tomando como datos de cálculos los valores típicos del aluminio. El valor estimado es de $C_{tilas} = 0,650$ [MJ/K], y el resultado obtenido en el modelo es de ese orden. Por ello, en el modelo 1 se representa la sala de ensayos como un conjunto del aire interior y de las *tilas* de la superficie de la envolvente. El coeficiente de corrección de la señal de las *tilas* también se asemeja al valor obtenido en el proceso de calibración mediante el método de integración de energía. El modelo 1 es la base para el posterior estudio de componentes, como es el caso del modelo 3, empleado como primer paso para el estudio del muro de calibración.

El modelo 2, planteado como siguiente paso en el análisis de la celda, es un modelo muy simplificado, ya que considera que toda la envolvente está sometida a la temperatura exterior, T_e , cuando la cara norte está en contacto con el ambiente de la sala de ensayos, que presenta una temperatura superior, y la cara sur recibe radiación solar sobre su superficie. Pero, como el flujo de calor intercambiado a través de las superficies laterales, paredes, cubierta y suelo, representan un porcentaje alto del flujo medido por las *tilas*, es una aproximación válida para comenzar a evaluar las propiedades térmicas de la envolvente de la sala de ensayos. Además, por su simplicidad, sirve como base para definir los intervalos de búsqueda de los parámetros de los siguientes modelos en el proceso de identificación. En la Figura 2.45 se muestran los resultados del análisis de los residuos de este modelo. Aunque en promedio, dichos residuos son inferiores a la incertidumbre de medida, tanto en la temperatura ambiente, T_i , como en el flujo de calor, Q_{hfs} , se producen picos puntuales. Estas desviaciones se generan debido a que el modelo presenta un desfase en los momentos de arranque del calefactor. Este aspecto ratifica la simplicidad del modelo.

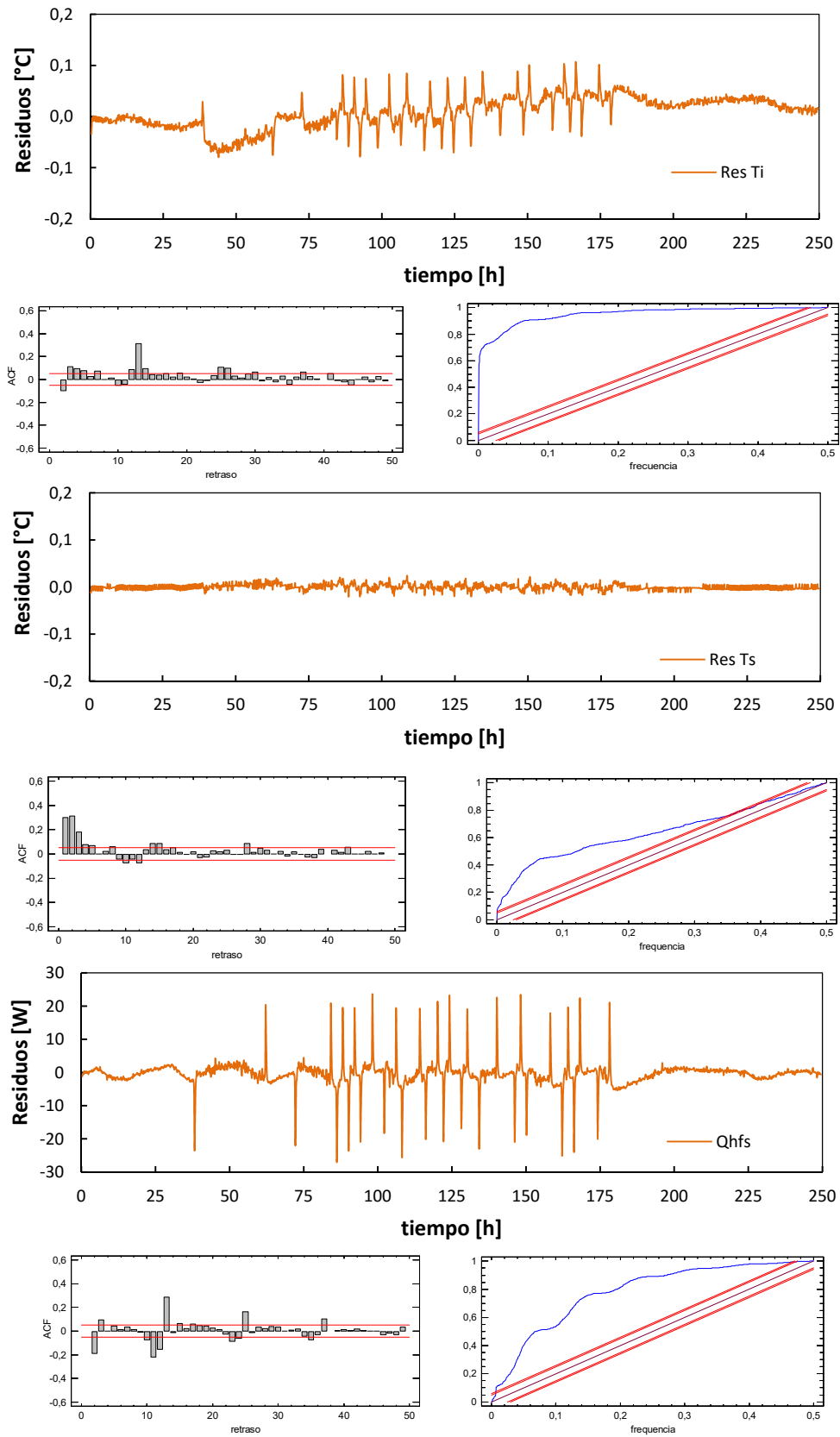


Figura 2.45 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PRBS

En relación a los valores obtenidos, Tabla 2.10, si se comparan con los estimados en el *Capítulo 1*, para la transmitancia de la envolvente, y la capacidad térmica, los resultados son muy próximos. Además, mediante este modelo se puede obtener una primera estimación del coeficiente de convección superficial interior. Un punto a evaluar, es el reparto de capacidades correspondientes al ambiente interior, C_i , y a la superficie de las *tiles*, C_s , que se ha obtenido mediante el proceso de identificación en el caso de la rutina *PRBS*. Aunque la suma de ambas capacidades es la obtenida para el resto de rutinas, su reparto no es adecuado. Esta es una situación que se suele producir en los métodos de identificación de parámetros, por ello, es necesario emplear excitaciones variables, con un abanico de frecuencias adecuado, para poder desacoplar eficientemente las propiedades térmicas de cada componente. Esta es la razón del desarrollo de la rutina *ROLBS*, como mejor rutina de ensayo. El modelo 3 ya plantea un estudio de componente, en este caso del muro de calibración, mediante la aplicación de la metodología que posteriormente se empleará para ensayar cualquier otro tipo de fachada con la celda *EGUZKI*. En este primer paso, se plantea un modelo sencillo del muro de calibración, representado con solamente dos transmitancias y una única capacidad térmica, modelo de primer orden.

En la Figura 2.46 se muestra el análisis de residuos de las funciones objetivo. Se puede observar que el modelo obtenido reproduce adecuadamente la evolución de la temperatura interior de la sala de ensayos, T_i . En el caso de la temperatura superficial del muro de calibración, T_s , y el flujo medido por las *tiles*, Q_{hfs} , el modelo presenta unos coeficientes de correlación válidos, pero en el periodograma integrado se aprecia que los residuos no se corresponden con ruido blanco. Este resultado se debe a la no consideración de los efectos de borde en el modelo, y a plantear todo el flujo medido como unidimensional. En el siguiente apartado se analiza con más detalle el estudio del muro de calibración hasta obtener un modelo adecuado. Pero, como primer paso, este modelo permite obtener una primera estimación del efecto de borde. En el modelo 4 se reproduce el análisis del modelo anterior, pero esta vez, centrando el estudio en la caracterización de la envolvente de la sala de ensayos. En este caso, como las condiciones de comportamiento de la envolvente son más homogéneas, el modelo simple que se ha aplicado se ajusta mejor a las variables objetivo, ver Figura 2.46. El módulo de los residuos, tanto para temperatura como para flujo de calor, es reducido, y los coeficientes de autocorrelación también toman valores pequeños. En el periodograma integrado se aprecia el efecto de dos frecuencias, en el rango de 0.1 y de 0.2, pero con menor amplitud que en el modelo anterior. El principal interés de analizar este modelo, es el de obtener valores de las propiedades de la envolvente fija de la sala de ensayos, desacoplando la parte correspondiente al componente de ensayo, que en este caso se trata del muro de calibración.

En la Figura 2.47 y Figura 2.48 se muestran los resultados para el modelo 5. En este caso se plantea el modelo más simple de la celda completa. Los dos modelos anteriores permiten obtener un rango para los valores de transmitancias y capacidades que facilitan el proceso de identificación de parámetros, y aseguran que se realiza de una forma más eficiente y directa. Las características de los residuos no difieren en gran medida de la evaluación de los casos que lo preceden. Sí es de destacar, que los residuos se ajustan de mejor forma al patrón de ruido blanco, aunque en los periodogramas integrados, se siguen apreciando componentes de autocorrelación en las frecuencias bajas. El modelo 6 ya comienza a presentar un grado de complejidad considerable, de cara a realizar un proceso de identificación. En este caso, se tiene en cuenta el intercambio que se produce a través de la cara norte de la sala de ensayos. Esta superficie presenta unas condiciones diferentes respecto al resto de la envolvente, al estar en contacto con el ambiente de la sala de servicio.

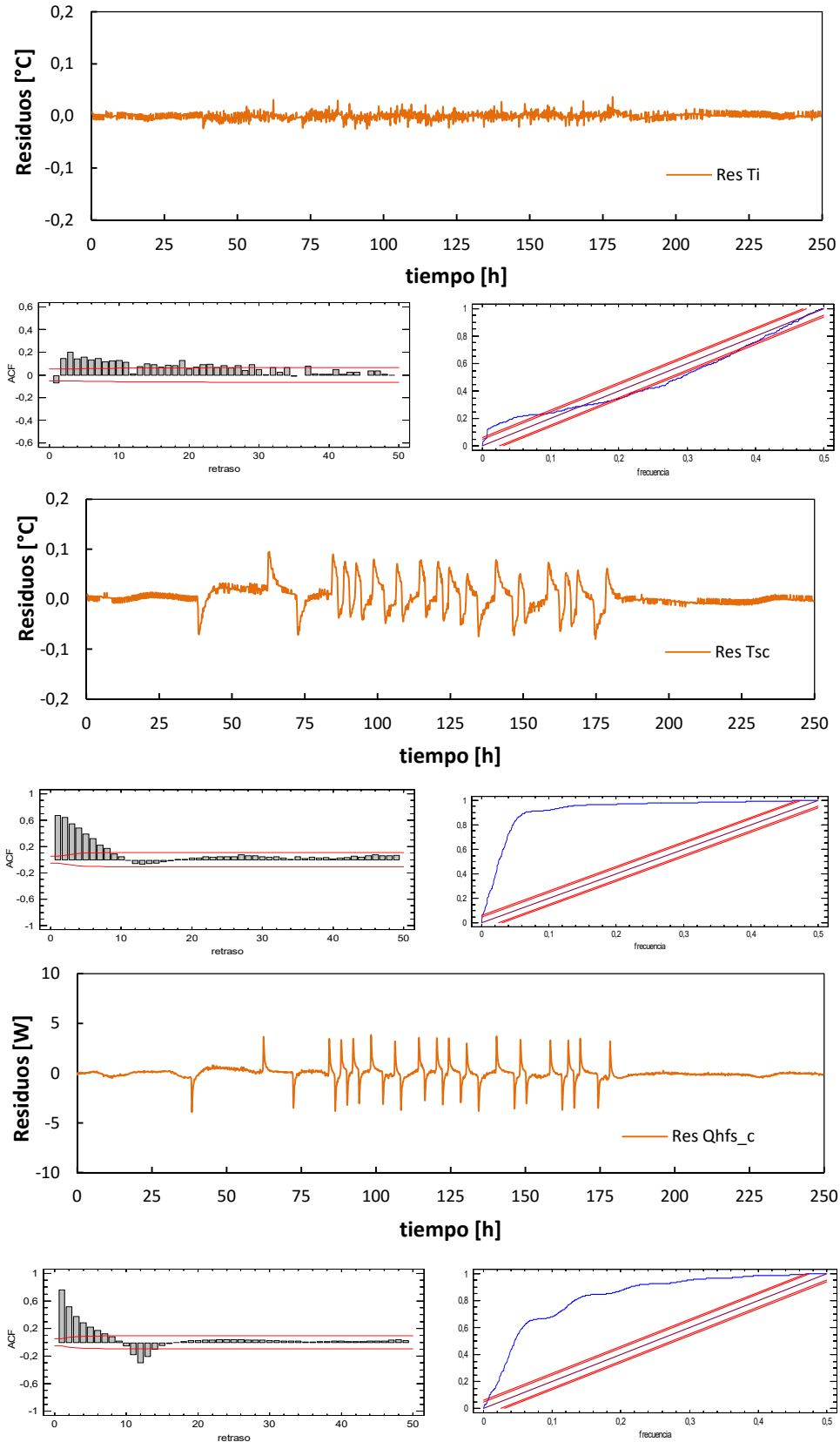


Figura 2.46 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación PRBS

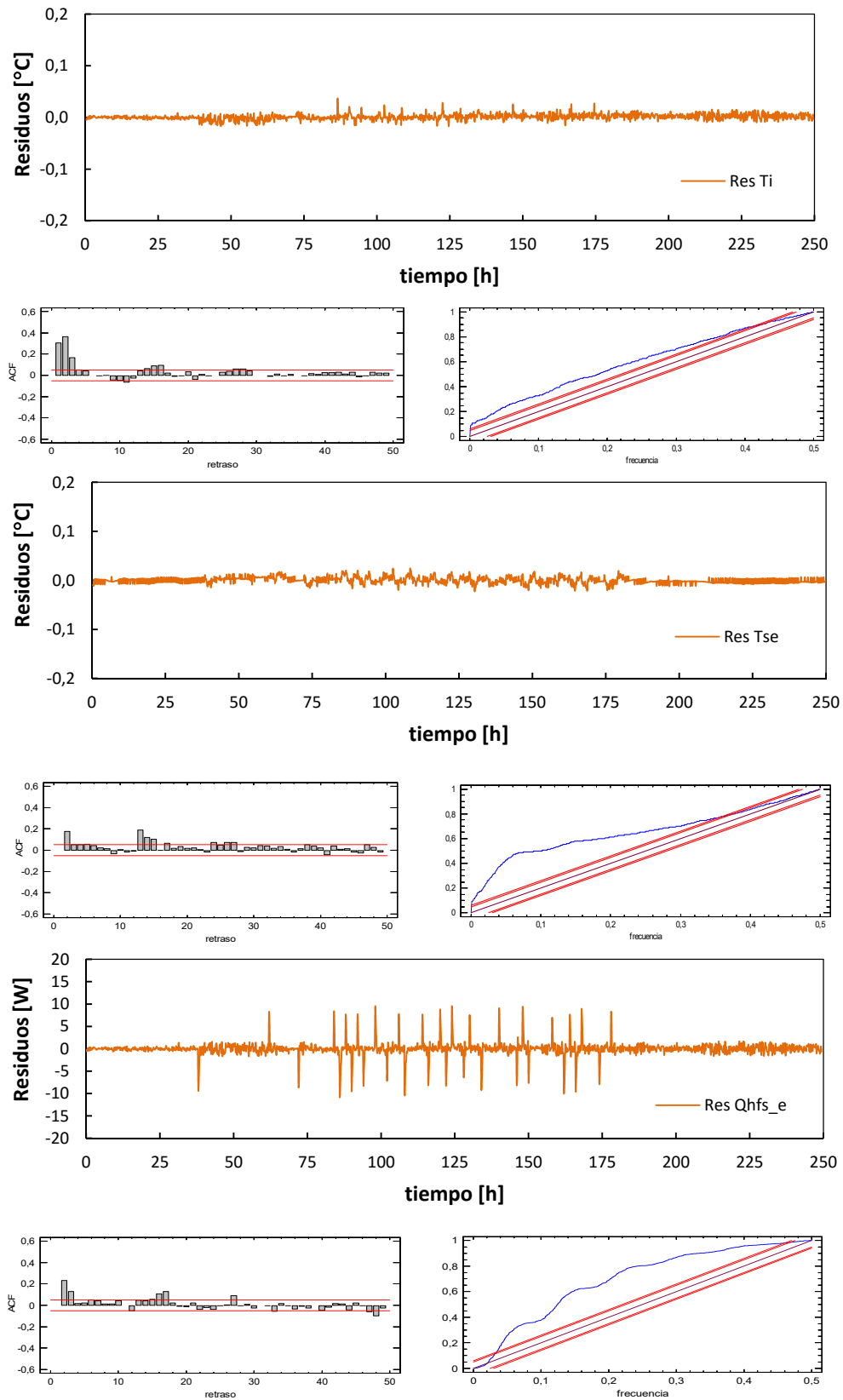


Figura 2.47 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación PRBS

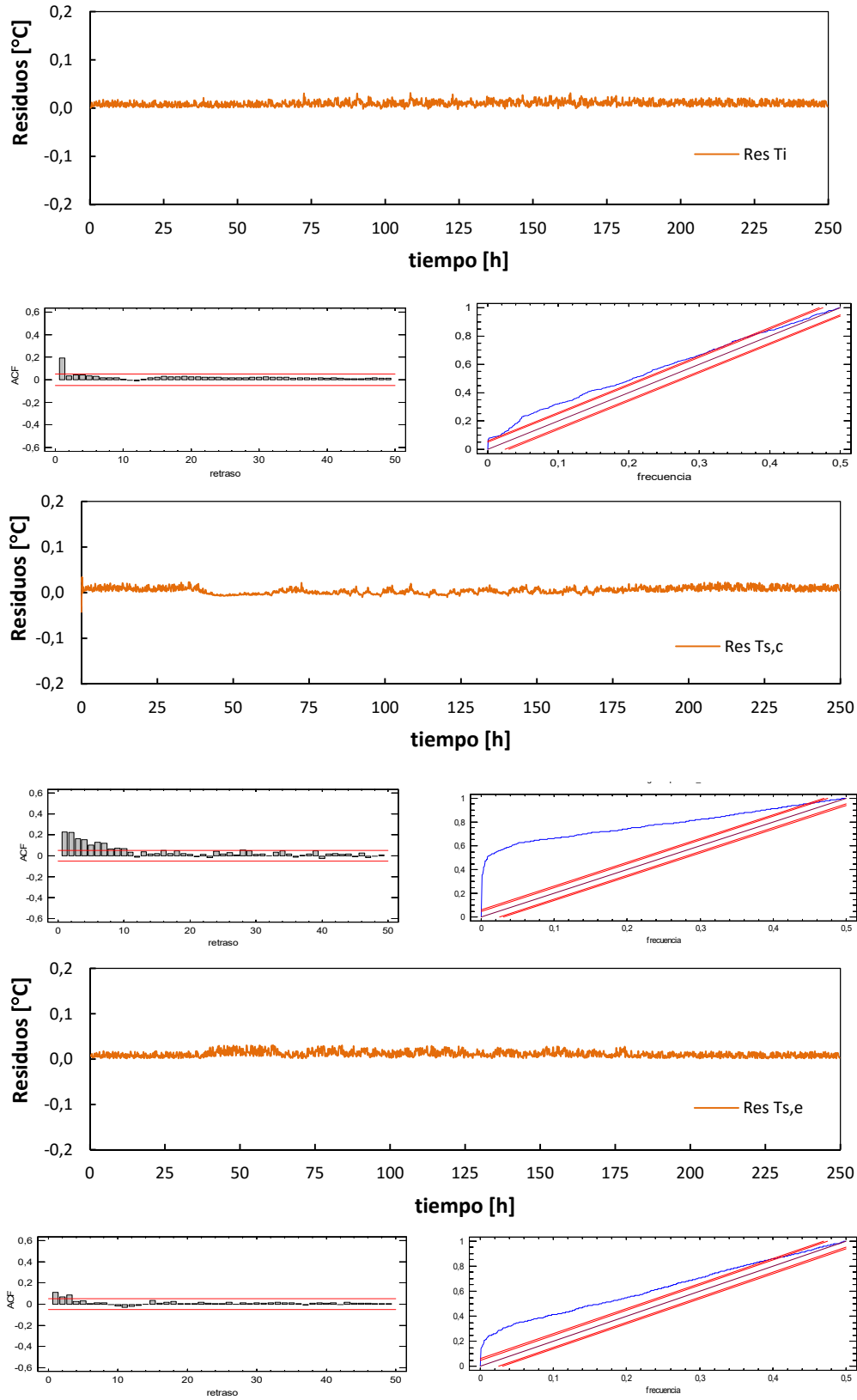


Figura 2.48 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación PRBS

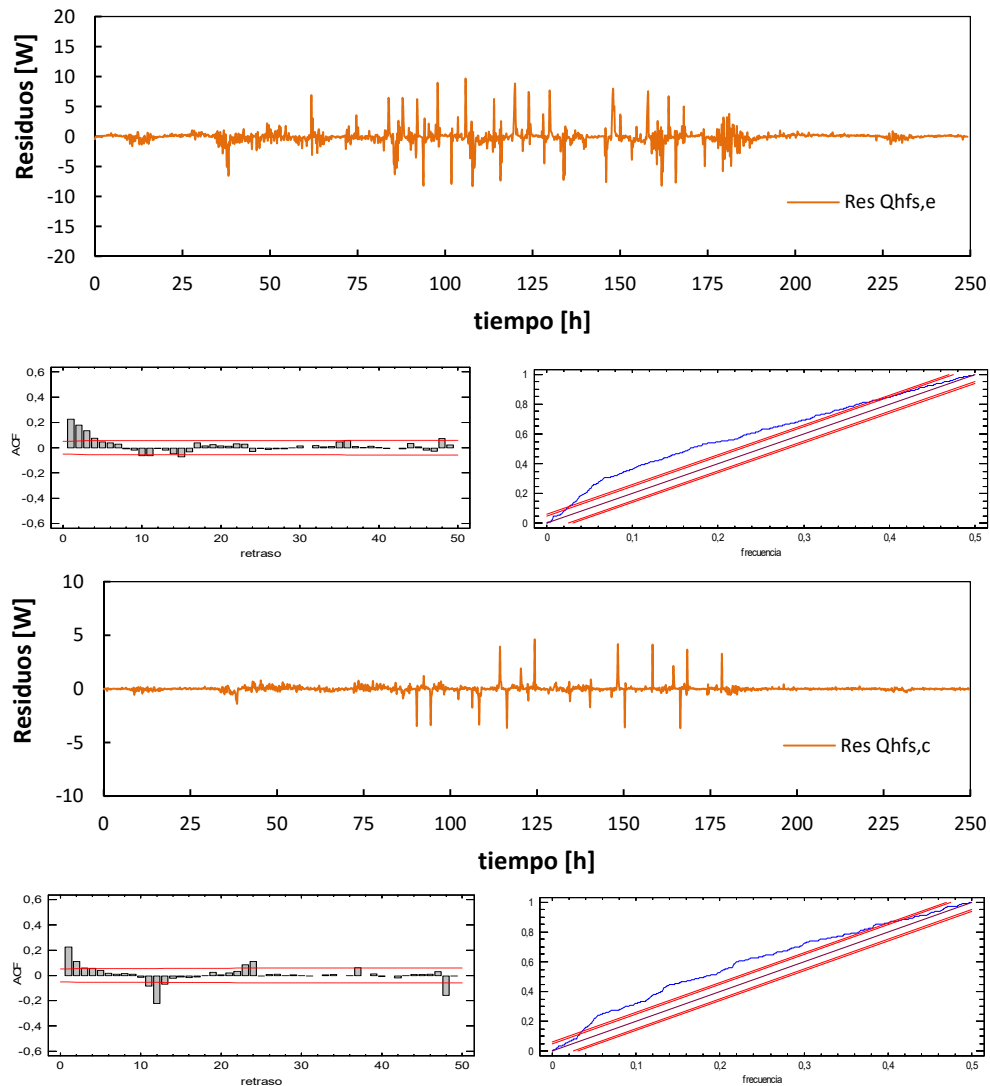


Figura 2.49 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación PRBS

Esta condición implica que la temperatura de aire de la sala de servicio presente una evolución muy diferente respecto a las temperatura ambiental exterior, y por tanto, compleja de reproducir con una sola rama de transmitancias, como la aplicada en el modelo 5. Como se puede apreciar en el análisis de residuos recogido en la Figura 2.49, en la Figura 2.50, y en la Figura 2.51, este modelo presenta un comportamiento mejorado con respecto a los modelos precedentes. En este caso, las variables con una mayor desviación del comportamiento a ruido blanco, corresponden a la temperatura y flujo de las paredes laterales junto con el techo y el suelo de sala de ensayos, definidas como $T_{s,l}$ y $Q_{hfs,l}$, respectivamente. La configuración constructiva diferente, y la variación en los coeficientes de convección superficiales, explicarían este peor comportamiento del modelo a la hora de reproducir las temperaturas superficiales y los flujos de calor con exactitud. Pero de forma general, este modelo se puede considerar como un buen modelo de representación del comportamiento térmico de la celda EGUZKI. Además, hay que tener en cuenta, que en este apartado se está buscando obtener un orden de magnitud de las propiedades térmicas de la celda, así como verificar la correcta medida del flujo de calor que realizan los grupos de *tiles*, y finalmente, contrastar los resultados del proceso de calibración del apartado 2.2.4.

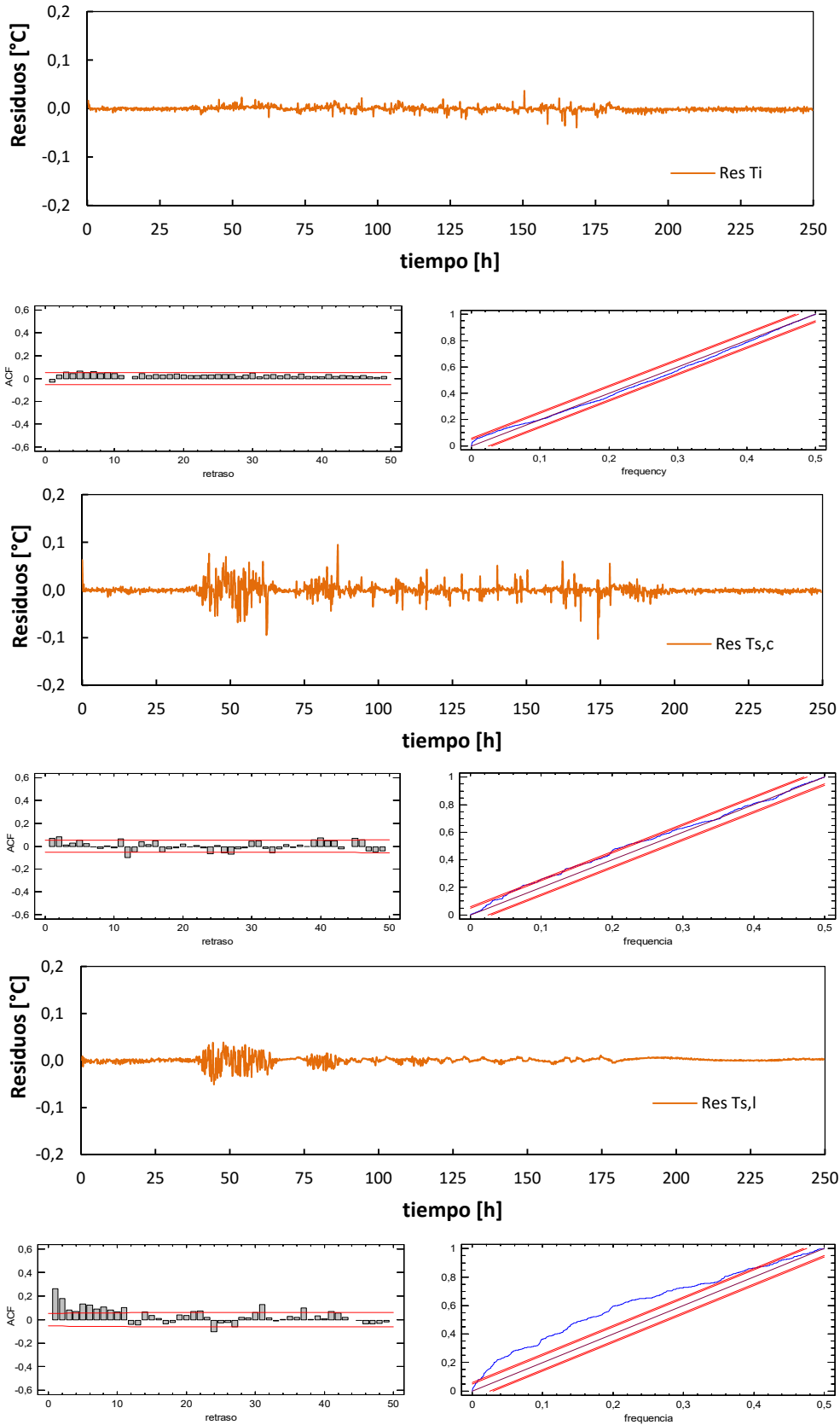


Figura 2.50 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

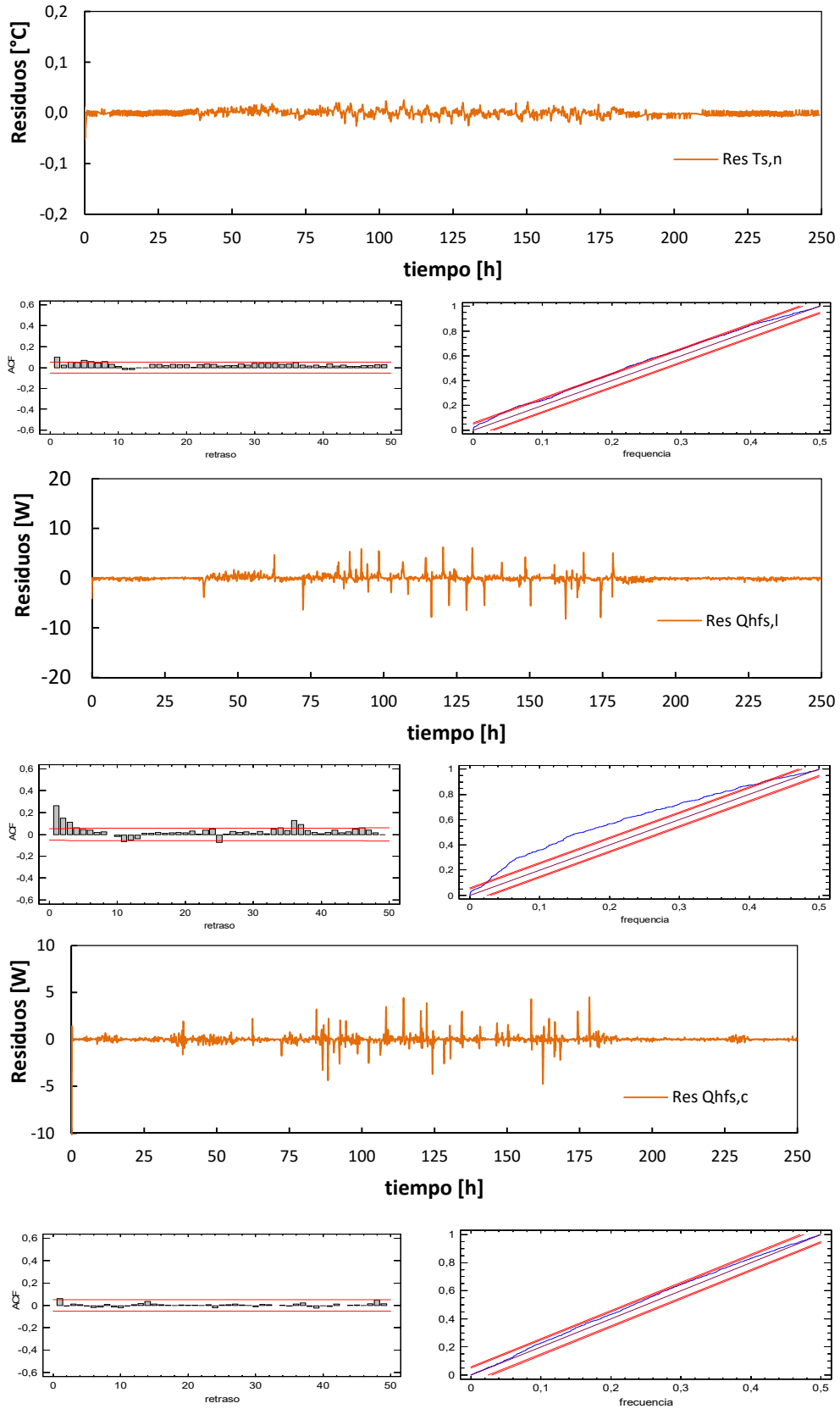


Figura 2.51 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

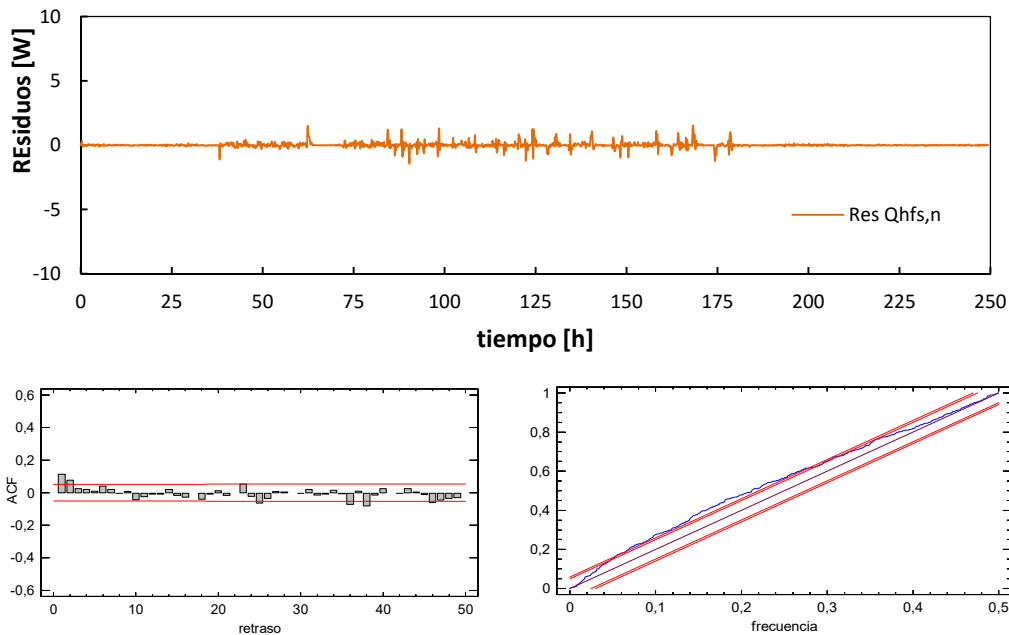


Figura 2.52 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

A la hora de realizar estudios de identificación de parámetros hay que tener en cuenta dos aspectos importantes. El primero consiste en encontrar un modelo que responda de acuerdo a la realidad física. El segundo consiste en encontrar un modelo cuya complejidad esté en concordancia con el nivel de información implícita en los datos. Por estas razones, para definir el modelo adecuado, debe realizarse un estudio con un nivel creciente de complejidad. Para el estudio de la sala de ensayos, se puede considerar que el modelo 6 cumple estos requisitos, analizando la evolución de los residuos, y su proximidad a la respuesta de ruido blanco. Por tanto, no se realiza un análisis de modelos más complejos y se pasa a estudiar los resultados obtenidos. En la Tabla 2.11 se recogen los valores estimados para los diferentes parámetros térmicos de la celda en general, y de la sala de ensayos, en particular, obtenidos del análisis estadístico del conjunto de estudios realizados para los diferentes modelos. Comenzando el análisis por las capacidades térmicas, para el aire interior de la sala de ensayos se obtiene un valor pequeño, $C_i = 0,026$ [MJ/K], inferior al esperado por la propia capacidad del aire interior de la sala de ensayos, junto con el resto de componentes que se encuentran ubicados dentro de ella. Esto se debe a que, al tratarse de un valor relativamente pequeño respecto al resto de capacidades del modelo, su identificación presenta mayor complejidad, y puede que parte del valor real se integre en las capacidades de otras partes del modelo. Para las *tilas* se obtiene un valor de $C_s = 0,724$ [MJ/K], el resultado está acorde con lo esperado, como ya se ha evaluado con anterioridad. Este resultado se debe contrastar con la suma de las capacidades obtenidas para la superficie de la envolvente más la superficie del muro de calibración. Esta suma es $C_{s,e} + C_{s,c} = 0,714$ [MJ/K], que difiere únicamente un 1,5%, por lo que se puede considerar que el resultado es coherente. Otro análisis que se puede realizar, es el reparto de capacidades por superficie, teniendo en cuenta que la superficie total de *tilas* es $S_{tilas} = 66,77$ [m²], y que el muro de calibración representa el 10,58%, la capacidad esperada sería de $(C_{s,c})^* = 0,075$ [MJ/K] y para la envolvente $(C_{s,e})^* = 0,638$ [MJ/K]. Comparando estos valores con los resultados del proceso de identificación, para la envolvente la desviación es del -17%, pero para la capacidad de la superficie de calibración la desviación es muy superior, del 55,1%. Aun así, estos resultados se pueden considerar válidos, ya que la medida de la temperatura superficial de las *tilas*, en el ensayo de calibración, presenta gran complejidad. Esta

temperatura de superficie está muy próxima a la de aire, debido al grado de aislamiento de la envolvente, lo que complica en gran medida el proceso de identificación.

	valor		u	
C_i	0,026		0,003	
C_s	0,724		0,061	
$C_{s,c}$	0,168		0,087	
$C_{s,e}$	0,545	±	0,138	[MJ/K]
C_{cel}	5,488		0,523	
C_c	0,309		0,066	
C_e	5,188		0,398	
H_i	453,2		77,4	
$H_{i,c}$	70,2		14,0	
$H_{i,e}$	351,1	±	62,6	[W/K]
H_c	0,980		0,086	
H_e	5,348		0,734	
A_{total}	1,054		0,017	
A_e	1,022	±	0,042	
A_c	1,141		0,076	

Tabla 2.11 – Resultados e incertidumbre de cálculo del proceso de identificación de parámetros para los principales parámetros de la celda EGUZKI

Para la capacidad térmica de la estructura de la sala de ensayos, se puede aplicar el mismo análisis. El valor total obtenido, únicamente difiere un 0,2% respecto al obtenido mediante la suma de las capacidades de la envolvente más la del muro de calibración, $C_e + C_c = 5,497$ [MJ/K]. Para la envolvente el valor obtenido es un 13,3% superior a la estimación que se ha realizado en el *Capítulo 2*, de $C_e = 4,497$ [MJ/K]. La diferencia puede achacarse a la capacidad del armazón de acero de la estructura, que no se ha tenido en cuenta en la estimación. En el caso del muro de calibración, con los datos de los materiales que lo componen, se puede realizar una estimación sencilla de la capacidad térmica, teniendo en cuenta que su configuración es muy homogénea. Este valor es del orden de $(C_c)^* = 0,266$ [MJ/K], que se desvía un 13,8% del valor obtenido en el estudio. Este resultado se analizará, más ampliamente en el *apartado 2.3.3*. En lo relativo a las transmitancias obtenidas, se puede realizar un análisis de validación equivalente al realizado anteriormente. Comenzando por la transmitancia de convección superficial interior de la sala de ensayos, H_i , el valor obtenido se correspondería con un coeficiente de convección de $\alpha_i = 6,8$ [W/m²K]. Para evaluar este resultado, se toman como referencia los valores de coeficientes de transmisión de calor para convección natural^[9]. En función de la dirección de transmisión del flujo de calor, se tiene que para la superficie de techo $\alpha_{cn,techo} = 5$ [W/m²K], para paredes verticales $\alpha_{cn,horz} = 2,5$ [W/m²K], y para el suelo $\alpha_{cn,suelo} = 0,7$ [W/m²K]. Si se ponderan estos valores en función de la superficie de cada componente, se obtiene un coeficiente de transmisión de calor promedio de $\alpha_{cn} = 2,2$ [W/m²K]. El resultado obtenido para la sala de ensayos es del orden de tres veces superior a la convección natural. Esto concuerda con las condiciones del interior de la sala de ensayos, en la que el ventilador tangencial genera un movimiento que produce una convección forzada. Esta agitación no debería ser muy superior al coeficiente de convección natural, ya que la potencia del ventilador esta reducida al mínimo.

Una vez validado el resultado total de la transmitancia superficial, otro contraste es verificar que la suma de transmitancias obtenidas para la superficie de la envolvente y del muro de calibración da un resultado equivalente. En este caso, el resultado de dicha suma es de $H_{i,e} + H_{i,c} = 421,3$ [W/K], que difiere únicamente un 7% del resultado total. Los valores de cada componente dan un coeficiente de convección para la superficie del muro de calibración de $\alpha_{i,c} = 9,9$ [W/m²K], y para el resto de la envolvente de $\alpha_{i,e} = 5,9$ [W/m²K]. Estos resultados también guardan concordancia con las condiciones físicas reales de la sala de ensayo. La salida de aire del cajón, donde se sitúa el calefactor y el ventilador tangencial, está orientada hacia la superficie del muro de calibración, y más próximo de éste que del centro de la sala de ensayos, para permitir la adecuada apertura de la puerta de acceso. Por esta configuración era de esperar un mayor coeficiente sobre la superficie interior del muro de calibración. Para el resto de la envolvente el coeficiente debe ser menor, y más próximo al resultado obtenido para el coeficiente global, como se puede verificar.

En el *Capítulo 1* se obtiene un valor estimado para la transmitancia de la envolvente de $H_e = 5,973$ [W/K], considerando los efectos de borde mediante el análisis estático normalizado. En el proceso de identificación, el resultado obtenido es muy próximo, con una desviación del 10,5%, por lo que, teniendo en cuenta que el valor de cálculo se ha realizado mediante una simplificación de los efectos de borde, se puede considerar que es un buen resultado. Para el muro de calibración, si se estima su transmitancia en función de las propiedades de los materiales que lo componen, el valor esperado sería de $H_c = 0,570$ [W/K]. El valor obtenido es un 72,1% superior. Este resultado es un primer indicador de los efectos de borde que se originan en la caracterización de las muestras debido al sistema de montaje. Para finalizar el análisis de resultados, queda por evaluar las aperturas de los flujos. En el ensayo de calibración se obtiene un factor de corrección para las *tiles* de $f_{ct} = 1,069$, mediante la integración de la energía intercambiada durante los diferentes ensayos, como se puede ver en el *apartado 3.3.4*. El valor equivalente, obtenido mediante los modelos de identificación es de $A_{total} = 1,054$, por lo que se contrastan los resultados. Si se descomponen las aperturas en las correspondientes al flujo medido por las *tiles* de la envolvente, y el flujo medido por las *tiles* instaladas en la superficie del muro de calibración, se observa que el mayor efecto se produce en estas últimas. En la envolvente $A_e = 1,022$, lo que indica que las correcciones aplicadas a los efectos de borde permiten medir el flujo intercambiado adecuadamente, necesitando un pequeño ajuste debido a la superficie no medida por las *tiles*. En el caso del muro de calibración esta corrección es mayor, con un valor de $A_c = 1,141$, pero dentro del 20% admitido como corrección máxima indicada en los procedimientos *PASLINK*.

Finalizando todo el proceso de calibración y el análisis de modelos, cabe destacar dos conclusiones importantes. La primera es, que la medida del flujo de calor que atraviesa la envolvente es adecuada, de forma que, tanto el proceso de calibración, como el método de caracterización de los efectos de borde, es adecuado. Este contraste es fundamental, ya que es la base para la medida del flujo de calor que intercambiarán las probetas bajo estudio en los diferentes ensayos. Al aumentar el detalle del modelo de la celda se obtiene un mejor ajuste, manteniéndose los valores globales de propiedades térmicas estimadas. Este resultado permite verificar el correcto comportamiento de cada uno de los grupos que conforman el sistema de *tiles*. La segunda conclusión es que se cumple el compromiso entre complejidad de ensayo y capacidad de analizar la realidad del comportamiento de las muestras bajo estudio. Aunque el modelo 6, el más complejo, reproduce adecuadamente el comportamiento térmico de la celda, el modelo más simple, correspondiente al modelo 1, genera un resultado adecuado para el mismo objetivo, reduciendo al máximo la complejidad de los ensayos, de forma que toda la potencialidad de los sistemas de identificación de

parámetros se centran en la caracterización de la muestra. Este es el principal objetivo del diseño de la celda PASLINK, y de la puesta a punto de la celda EGUZKI, en concreto, y se verifica a través del estudio de calibración realizado. En el análisis de resultados, se puede observar que las mayores desviaciones, entre los valores esperados para las propiedades térmicas, y los valores estimados con los modelos, se producen en la caracterización de la muestra. Esto se debe a la simplicidad del modelo planteado para la representación del muro de calibración. Se ha empleado un modelo de primer orden en todos los casos, con una sola capacidad térmica y dos conductancias, aunque este modelo es insuficiente para poder reproducir el efecto de borde que se da en la probeta. Por esa razón es necesario realizar un estudio más amplio, que se detalla en el siguiente apartado, de cara a finalizar el proceso de calibración de la celda.

2.3.3 Modelo del muro de calibración

En la documentación del SIC ^[9], Nygaard y Madsen plantean una forma sencilla de determinar la validez en la aproximación del modelo de parámetros concentrados, y calcular el mínimo orden del modelo. Partiendo del caso general de un material homogéneo, y sin efectos no lineales, como puentes térmicos, efectos de borde, etc..., la transmisión de calor por conducción sigue la ecuación [2.50], donde $T(x,t)$, es la temperatura en el instante t y a la profundidad x , y α es la difusividad del material. Se trata de una ecuación diferencial parcial, lineal, e invariante en el tiempo, lo que implica un vector de estado de dimensión infinita.

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad [2.50]$$

Esta ecuación tiene una solución analítica compleja para las condiciones de contorno de pared plana, en el dominio del tiempo, pero sí en el dominio de Fourier, donde pasa a ser una ecuación diferencial ordinaria, ecuación [2.51], donde $s = j\omega$, que presenta la solución general [2.52].

$$\frac{\partial^2 T(x,s)}{\partial x^2} = \frac{s}{\alpha} T(x,s) \quad [2.51]$$

$$T(x,s) = F_1(s) \text{Sinh}(x\sqrt{s/\alpha}) + F_2(s) \text{Cosh}(x\sqrt{s/\alpha}) \quad [2.52]$$

Como los datos que se pueden registrar en los ensayos corresponden a las temperaturas y flujos superficiales intercambiados, se puede obtener la resolución de la ecuación de transmisión de calor en forma matricial en función de estas variables según la ecuación [2.53].

$$\begin{bmatrix} T(x_0,s) \\ q(x_0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cosh}[d\sqrt{s/\alpha}] & \text{Sinh}\left[\frac{(d\sqrt{s/\alpha})}{(\lambda\sqrt{s/\alpha})}\right] \\ (\lambda\sqrt{s/\alpha})\text{Sinh}[(d\sqrt{s/\alpha})] & \text{Cosh}[d\sqrt{s/\alpha}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(x_d,s) \\ q(x_d,s) \end{bmatrix} \quad [2.53]$$

Si del sistema de ecuaciones se despeja el flujo en la cara exterior, $q(x_d,s)$, se puede obtener una ecuación que relaciona la evolución de la temperatura de la cara interior,

$T_1(s) = T(x_0, s)$, con la evolución de la temperatura en la cara exterior, $T_2(s) = T(x_d, s)$, y el flujo en la cara interior, $q_1(s) = q(x_0, s)$, ecuación [2.54].

$$T_1(s) = G_1(s)q_1(s) + G_2(s)T_2(s) \quad [2.54]$$

Donde $G_1(s)$ es la función de transferencia entre el flujo interior y la temperatura interior, y $G_2(s)$ es la función de transferencia entre la temperatura exterior y la temperatura interior, y toman los valores indicados en [2.55].

$$G_1(s) = \frac{\frac{R}{\sqrt{sRC}} \operatorname{Sinh}(\sqrt{sRC})}{\operatorname{Cosh}(\sqrt{sRC})} \quad [2.55]$$

$$G_2(s) = \frac{1}{\operatorname{Cosh}(\sqrt{sRC})}$$

La introducción de los parámetros de resistencia y capacidad térmica, R y C , permite aproximar la respuesta dinámica de la ecuación [2.50] mediante un sistema lineal de orden N compuesto por ecuaciones diferenciales ordinarias, de fácil resolución. Sumando al desarrollo realizado para la transmisión de calor por conducción, las componentes de convección y radiación, se obtiene el modelo aproximado indicado en la expresión [2.11], y que como se ha comentado anteriormente, se suele denominar modelo de parámetros concentrados. Volviendo al proceso de conducción, el modelo aproximado convergería con el modelo real para $N \rightarrow \infty$. Pero en las aplicaciones reales, y más teniendo en cuenta la limitación del orden del modelo a la hora de aplicar métodos de identificación de parámetros, es necesario trabajar con el menor orden posible, siempre que represente adecuadamente el comportamiento de la probeta bajo estudio. Las propiedades dinámicas del muro vienen definidas por los polos y ceros de la ecuación [2.50], y una forma de calcular estos es aplicar la expansión en una serie de productos de las funciones $\operatorname{Sinh}(x)$ y $\operatorname{Cosh}(x)$, como se indica en [2.56].

$$\operatorname{Sinh}(x) = x \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{x^2}{n^2\pi^2} \right) \quad [2.56]$$

$$\operatorname{Cosh}(x) = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{x^2}{[(n - 1/2)\pi]^2} \right)$$

Sustituyendo estos desarrollos en la función de transferencia del flujo interior, $G_1(s)$, indicada en la ecuación [2.55], se obtienen las expresiones [2.57] para los polos y ceros.

$$z_n = -\left(\frac{n\pi}{\sqrt{RC}} \right)^2 \quad [2.57]$$

$$p_n = -\left(\frac{(n - 1/2)\pi}{\sqrt{RC}} \right)^2$$

De donde se puede determinar la frecuencia límite de la serie de productos que es capaz de reproducir el modelo de orden N , mediante la sencilla expresión [2.58].

$$\nu = \frac{|z_n|}{2\pi} \rightarrow N = \sqrt{\frac{2RC\nu}{\pi}} \quad [2.58]$$

Esta aproximación permite determinar un valor límite superior del orden del modelo, N , en función de las frecuencias de excitación a las que está sometido. Para los casos reales, en los que existe una componente de ruido en las variables medidas de temperatura y flujo, el orden del modelo necesario para representar el comportamiento del sistema es inferior al estimado. El muro de calibración tiene una configuración muy simple y homogénea, formada por el núcleo de EPS y dos placas de madera de contrachapado de cierre exterior. Esto permite que se pueda estimar adecuadamente los valores de resistencia y capacidad térmica. Empleando los datos de las propiedades térmicas de los materiales que se indican en el *Capítulo 2*, se obtiene que el orden del modelo debe ser $2 \leq N \leq 12$. El valor inferior se obtiene al emplear el periodo de $T = 24$ [h], correspondiente a las excitaciones exteriores, y el valor superior, al emplear un periodo de $T = 0.5$ [h], perteneciente al intervalo base con el que se configura la rutina *ROLBS*, que es la rutina de frecuencia más alta.

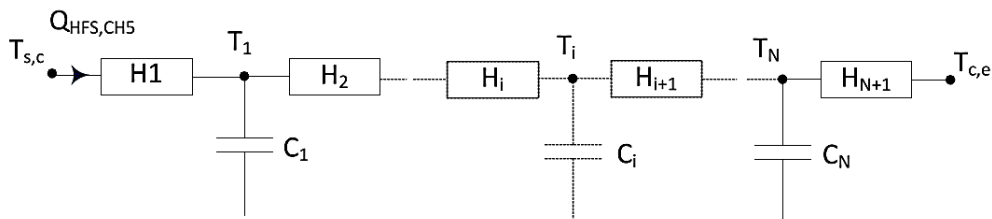


Figura 2.53 – Modelo unidimensional para la zona central del muro de calibración

N	1	2	3	4	5	6	media	σ
H [W/K]	0.212	0.219	0.207	0.203	0.206	0.205	0.205	0.006
C [MJ/K]	0.078	0.079	0.076	0.076	0.076	0.077	0.076	0.001
u [%]	3.4	6.5	2.9	2.3	2.4	2.0		
	2.4	3.6	2.0	2.1	2.2	2.7		

Tabla 2.12 – Resultados del proceso de identificación para la transmitancia y capacidad térmica de la zona central del muro de calibración

Hay que tener en cuenta que el orden del modelo tiene una gran repercusión a la hora de aplicar métodos de identificación de parámetros, como ya se ha indicado. Modelos de orden elevado hacen muy compleja dicha identificación. Por tanto, es necesario llegar a un compromiso entre la capacidad del modelo para representar el comportamiento de la muestra y, por otro lado, poder trabajar con un número de parámetros a identificar lo más reducido posible, que permita obtener resultados fiables y factibles. Por esta razón, como fase previa al análisis directo del muro completo, se realiza un estudio comparando modelos de orden creciente de la zona central de la probeta, en la que el flujo es unidimensional y está registrado por el CH5 de los grupos de *tiles*. Los modelos se plantean aplicando las temperaturas superficiales como entradas, y el flujo de las *tiles* como función objetivo, ver Figura 2.53. En la Tabla 2.12 se recogen los resultados del proceso de identificación, obtenidos del análisis de la rutina *ROLBS*, ya que es la rutina de ensayo más exigente, y en función del orden creciente del modelo.

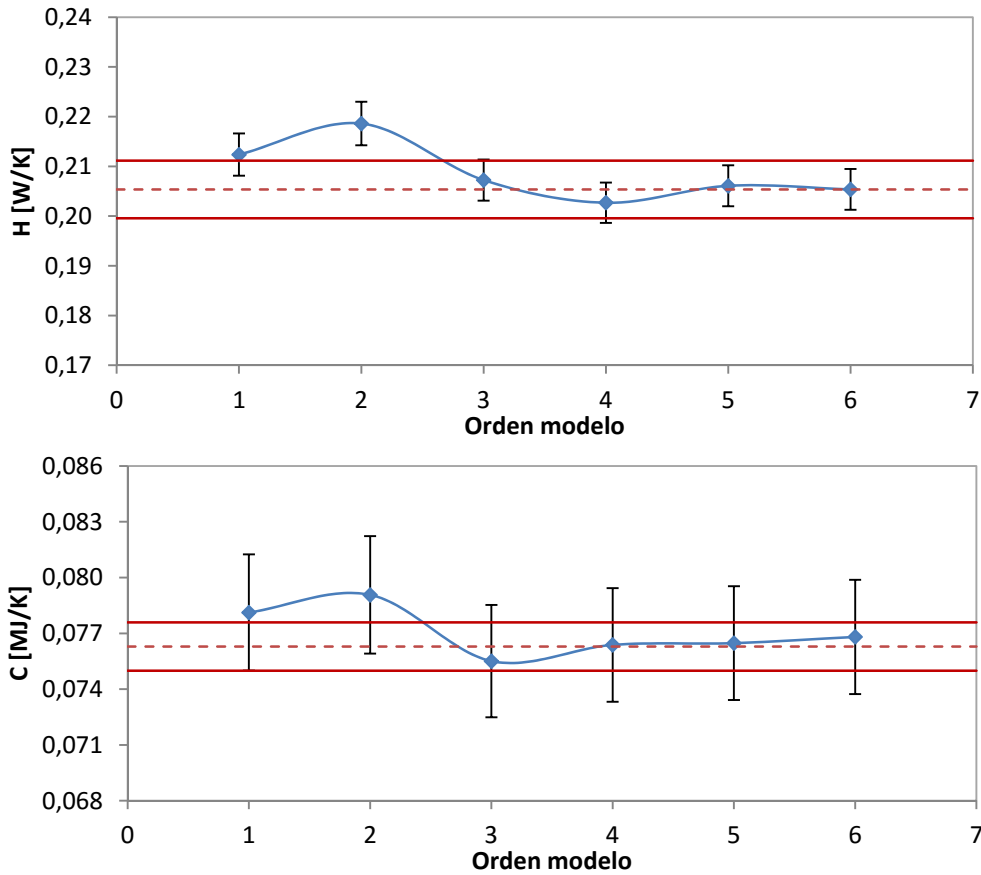


Figura 2.54 – Resultados en función del orden del modelo, para el flujo central del muro de calibración

	H [W/K]	C [MJ/K]
PULSO	0.611	0.277
PRBS	0.607	0.261
ROLBS	0.598	0.274
media	0.605	0.270
σ	0.004	0.005

Tabla 2.13 – Resultados del proceso de identificación para la transmitancia y capacidad térmica de la zona de borde del muro de calibración

	S [m ²]	H		C	
		[W/K]	[W/m ² K]	[MJ/K]	[MJ/m ² K]
CENTRO	2,46	0,205	0,083	0,076	0,031
BORDE	4,77	0,605	0,127	0,270	0,057

Tabla 2.14 – Análisis del efecto de borde en la caracterización del muro de calibración

Los resultados completos de los diferentes modelos se recogen en el Anexo A. En la Figura 2.54 se muestra de forma gráfica la evolución de la transmitancia y capacidad térmica calculadas, junto con el valor medio y las bandas de incertidumbre correspondientes a la desviación estándar del conjunto de resultados.

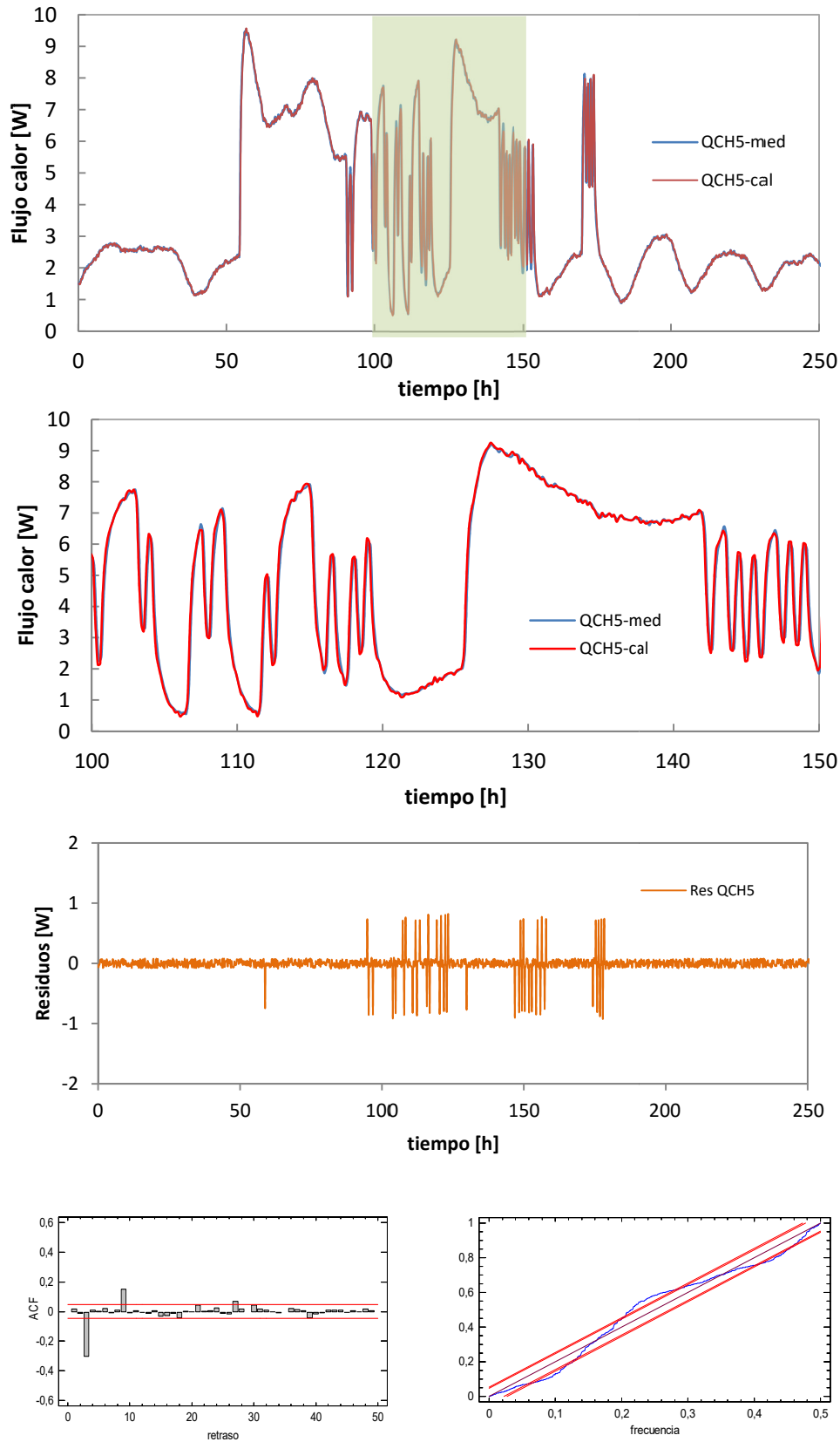


Figura 2.55 – Análisis del modelo unidimensional del muro de calibración para la excitación ROLBS

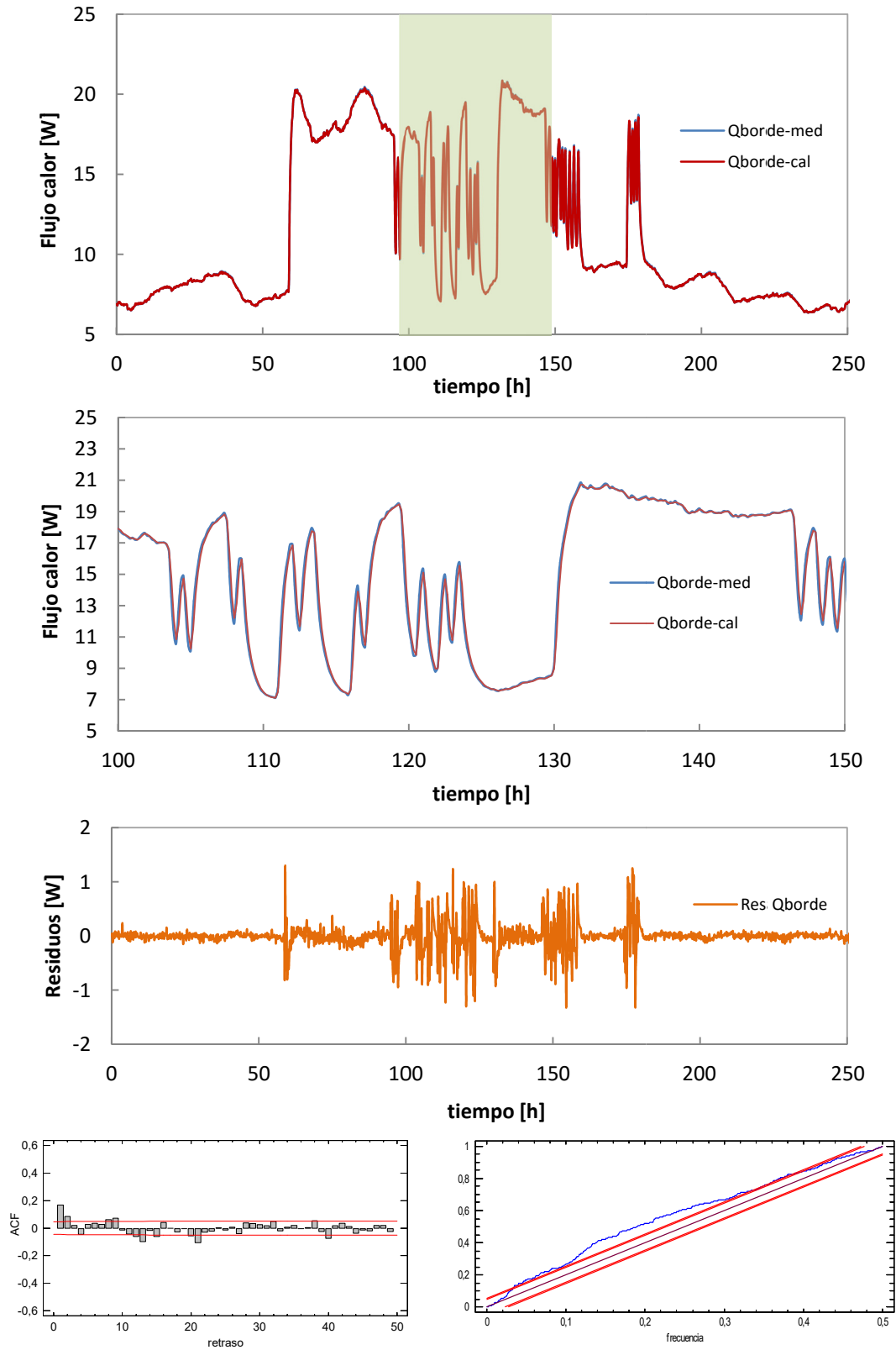


Figura 2.56 – Análisis de los efectos de borde del muro de calibración para la excitación *ROLBS*

Aunque los modelos de primer y segundo orden dan resultados razonables, solo a partir del modelo de tercer orden el error cometido es igual o inferior al $e_r \leq 3\%$. Si se analizan los residuos, igualmente, es a partir del modelo de orden tres que se obtiene un patrón de ruido blanco. En la Figura 2.55 se muestra el resultado del modelo en el caso de la excitación ROLBS. Teniendo en cuenta el compromiso de buscar el modelo más simple, para continuar con el estudio, se elige el modelo de tercer orden. Una vez analizada la zona central del muro de calibración, el siguiente paso consiste en determinar la magnitud de los efectos de borde que se producen. Para ello, se emplea como flujo del modelo la suma de los grupos de borde, formados por los canales CH1 a CH4. En la Figura 2.56 se muestran los resultados del ajuste del modelo para la zona de borde. Pese a que el premarco aislante del portaprobetas tiene una configuración constructiva diferente en la zona inferior, y los flujos laterales son algo más pequeños que los correspondientes a las zonas superior e inferior del muro de calibración, como se puede ver en el apartado 2.2.2, el modelo conjunto se ajusta de forma válida. Los residuos son pequeños en magnitud, y los valores de autocorrelación y el periodograma indican un comportamiento muy próximo a ruido blanco. En la Tabla 2.13 se recogen los resultados de la transmitancia y capacidad térmica obtenidas para la zona de borde, tras analizar cada una de las rutinas de ensayo. En la Tabla 2.14 se muestran las propiedades térmicas totales obtenidos para el muro de calibración. Los valores de transmitancia y capacidad térmica incluyendo los efectos de borde son $H_c = 0,811$ [W/K] y $C_c = 0,347$ [MJ/K], que concuerdan con los primeros valores aproximados, obtenidos a través del modelo de primer orden del muro de calibración empleado en el análisis de la celda completa, indicados en la Tabla 2.11, donde $H_c = 0,980 \pm 0,086$ [W/K] y $C_c = 0,309 \pm 0,066$ [MJ/K]. Las diferencias entre resultados proceden, por una parte, de la elección adecuada del orden del modelo, y por otra parte, y en mayor medida, por el análisis adecuado de los efectos de borde. Por tanto este efecto es fundamental caracterizarlo adecuadamente durante los ensayos, para poder obtener resultados adecuados de las propiedades térmicas de las muestras bajo estudio.

	Q_{hfs_total} [W]	Q_{hfs_ch5} [W]	$(T_{se,a}-T_e)$ [°C]	L_{borde_mc} [m]	Ψ_{mc} [W/mK]
PULSO	13,13	9,19	17,39		0,021
ROLBS	14,90	10,33	18,24	10,64	0,024
PRBS	14,08	10,08	15,99		0,024
				media	0,023
				σ	0,001

Tabla 2.15 – Cálculo experimental del coeficiente lineal de efecto de borde

Si se vuelven a repasar los resultados de la Tabla 2.14, la transmitancia en la zona de borde es un 52% superior a la zona central, en la que el flujo presenta condiciones unidimensionales. Los efectos de borde tienen un peso representativo en el comportamiento de la muestra. Teniendo en cuenta que los efectos de puente térmico tienen mayor relevancia cuanto más aislante es la muestra, este valor correspondería al límite superior de la influencia del portamuestras en el estudio de la probeta, ya que el muro de calibración, de 40 [cm] de aislante, correspondería con la muestra de mayor resistencia térmica. Hay que tener en cuenta que cuando se realizan ensayos convencionales no se dispone del grado de información de los flujos de calor de borde y central, como el que se dispone en el estudio del muro de calibración. Y por tanto, en la metodología de ensayo, los flujos que intercambia la probeta deben deducirse a través de la medida de las condiciones interiores de la sala de ensayos, junto con la potencia introducida y el flujo que escapa por la envolvente. Por esta razón, es necesario que los modelos de estudio sean capaces de caracterizar adecuadamente las

probetas con las variables de entrada medidas. En el apartado 2.1.3 se ha indicado un método aproximado de cálculo del efecto de borde. Aplicando las ecuaciones [2.9] y [2.10], se determina el coeficiente lineal del efecto de borde Ψ . Para el muro de calibración se obtienen los resultados indicados en la Tabala 2.15 El valor promedio obtenido del coeficiente de borde es de $\Psi = 0,023 \pm 0,001$ [W/mK]. Este valor es útil para estimar dichos efectos, aunque como se ha comentado anteriormente, no es suficientemente preciso como para representar dichos efectos para las precisiones del ensayo PASLINK. Se puede aprovechar la potencialidad de las herramientas de identificación de parámetros para poder representar de forma más adecuada los efectos de borde. En la Figura 2.57 se muestra un modelo en el que se representan las condiciones de ensayo convencionales, para el muro de calibración.

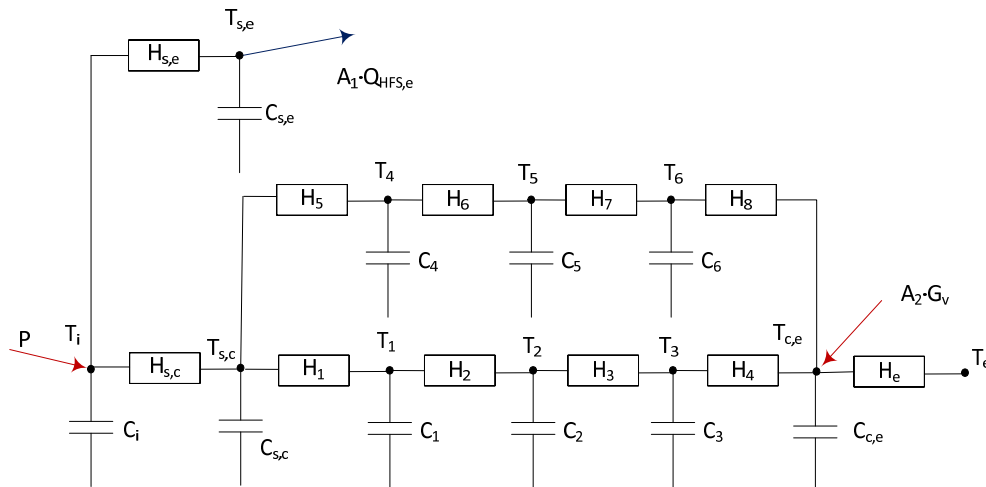


Figura 2.57 – Modelo de caracterización para el muro de calibración

En este modelo las variables de entrada son la potencia de calefacción, el flujo de las *tiles* de la envolvente, la temperatura exterior y, la radiación solar sobre la superficie vertical, $[P, Q_{HFS,e}, T_{er}, G_v]$. Y las variables objetivo del modelo son la temperatura de aire interior, la temperatura de superficie de la envolvente y las temperaturas superficiales interior y exterior del muro de calibración $[T_i, T_{se}, T_{s,c}, T_{c,e}]$. Continuando con la rutina ROLBS como ejemplo, en la Figura 2.58 y en la Figura 2.59 se muestran las variables de entrada, y las funciones objetivo respectivamente. Para el análisis del muro de calibración, se dejan libres los valores de los parámetros propios de la celda y se comparan con los obtenidos del proceso de calibración. De esta forma se mejora el proceso de ajuste de las herramientas de identificación para determinar las propiedades de la probeta bajo estudio. Por otro lado, esta es la metodología que se aplica en el resto de ensayos de caracterización de muestras mediante la celda EGUZKI. Los resultados del estudio del muro de calibración permiten así verificar todo el proceso de ensayo desarrollado. En la Figura 2.60 se muestra la evaluación de los residuos de las temperaturas superficiales, empleadas como variables objetivo. Para la temperatura superficial interior, $T_{s,c}$, los residuos obtenidos presentan un patrón de ruido blanco, con una desviación entre el modelo y los datos medidos durante el ensayo muy reducida. Para la temperatura superficial exterior, $T_{c,e}$, los residuos presentan un patrón claro de autocorrelación, que exige un análisis más detallado. En el gráfico de residuos se puede observar claramente un comportamiento periódico. Lo confirma el diagrama de autocorrelaciones, en el que se detecta una componente principal de periodicidad del orden 20 [h], y otra menor con periodicidad del orden de 10 [h]. Otro indicador es el signo de los coeficientes de autocorrelación. Los valores son positivos o negativos de forma progresiva, pero sin alternancia. Esto indica que el modelo sobrestima o subestima la temperatura superficial de forma periódica.

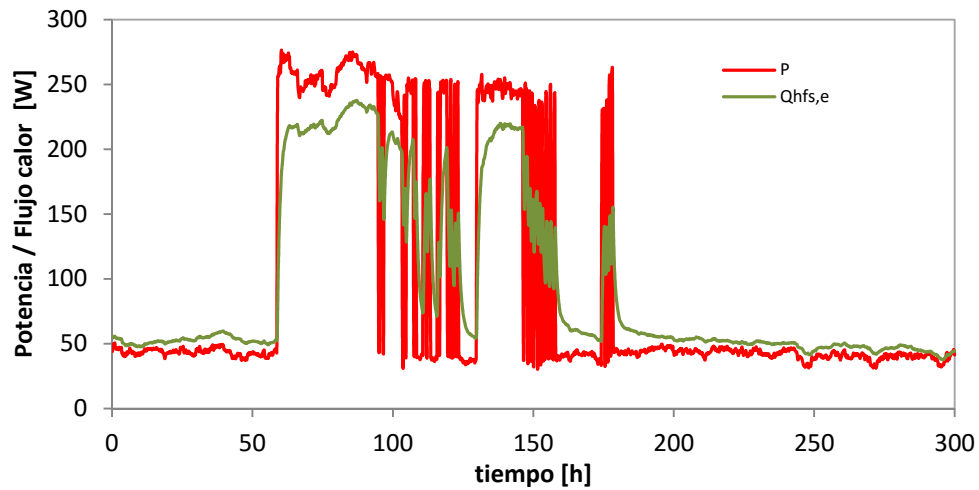
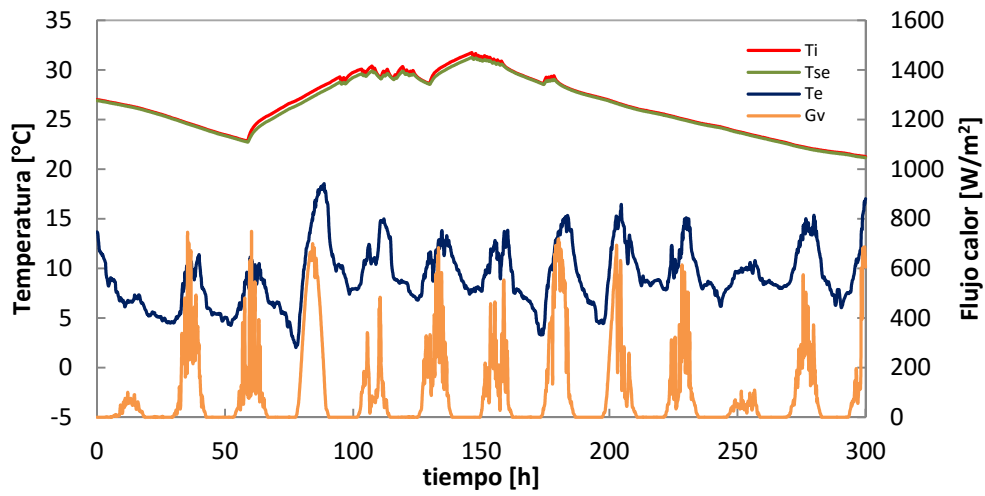


Figura 2.58 – Variables de entrada para el estudio del muro de calibración, en la rutina ROLBS

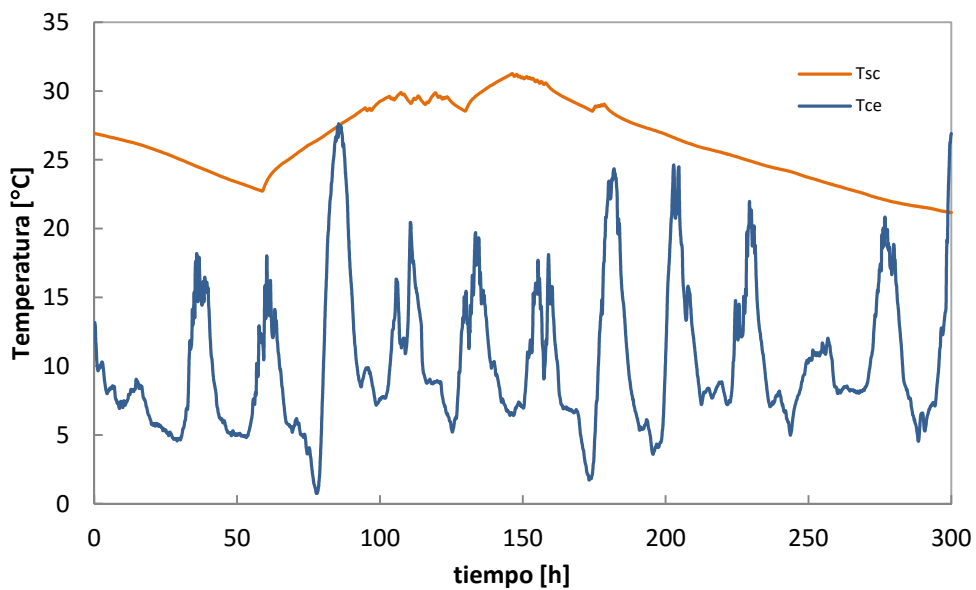


Figura 2.59 – Variables objetivo para el estudio del muro de calibración, en la rutina ROLBS

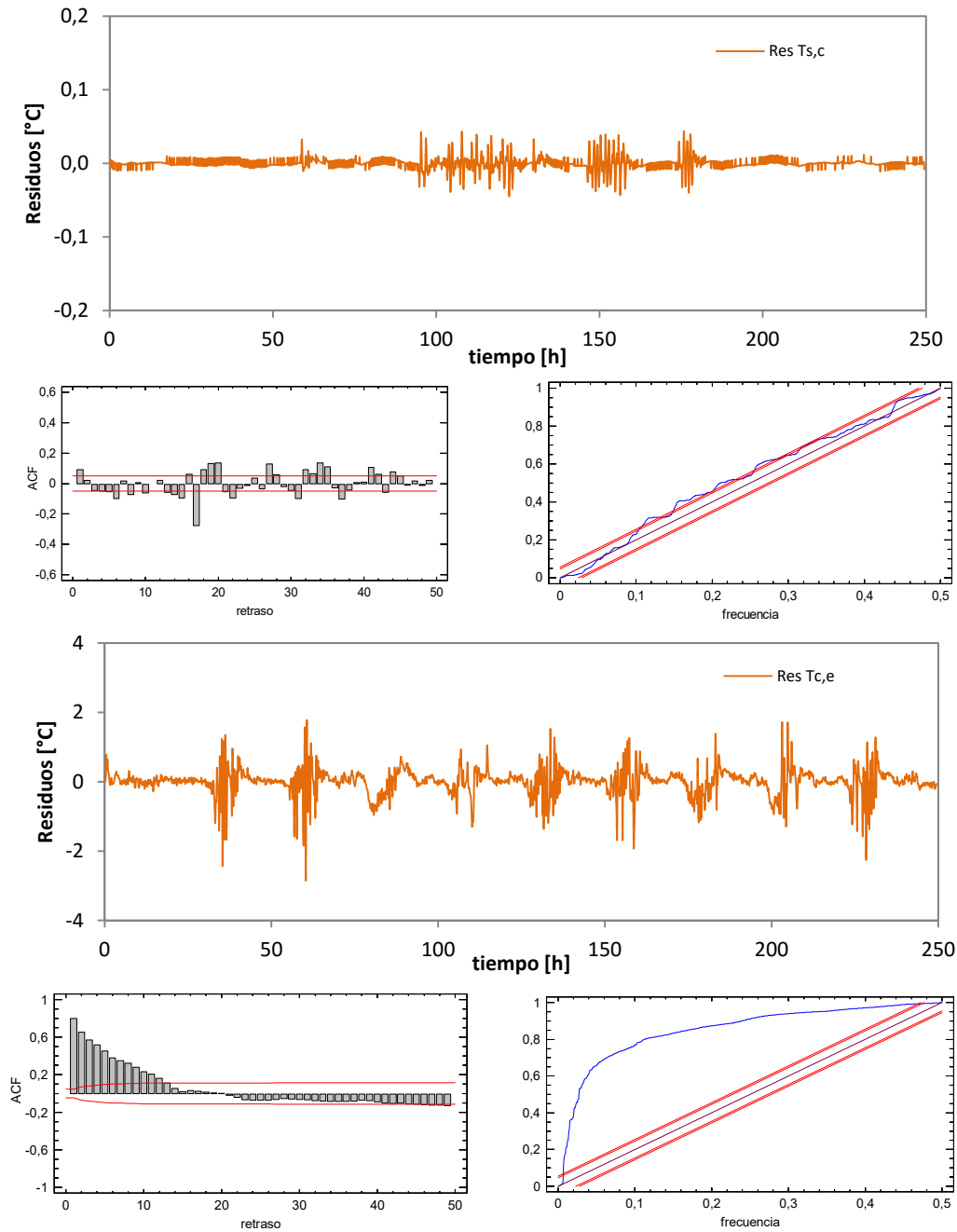


Figura 2.60 – Análisis de residuos de las temperaturas superficiales del muro de calibración, excitación ROLBS

Estas componentes también se pueden observar en el periodograma integrado, que se desvía claramente de la diagonal, con mayores componentes en las bajas frecuencias. En la Figura 2.61 se muestra de forma comparativa la temperatura medida frente a la calculada por el modelo. Se puede ver que el modelo no alcanza los valores máximos de los datos medidos, y predice valores superiores en los periodos de mínimas temperaturas. En la Figura 2.62 se muestra con más detalle un periodo de 50 [h]. Este intervalo de tiempo contiene dos días tipo, el primero corresponde a un día nublado, y el segundo a un día despejado, con incidencia solar representativa. Se puede apreciar cómo en el intervalo que va de las 50 [h] a las 70 [h], que corresponde con el día nublado, el ajuste de las temperaturas es bueno.

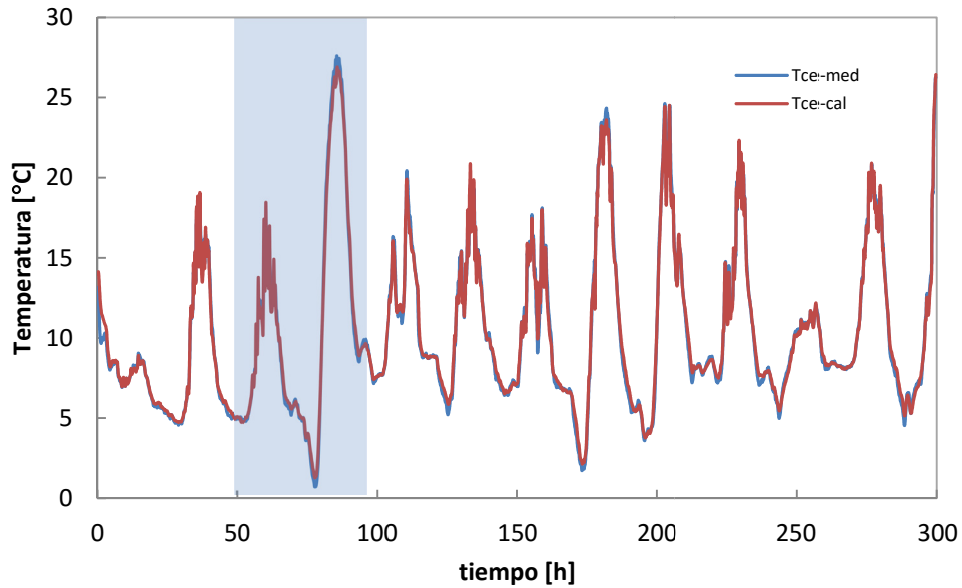


Figura 2.61 – Comparativa de la temperatura superficial exterior, T_{sc} , del muro de calibración entre el modelo y los valores medidos, en la rutina ROLBS

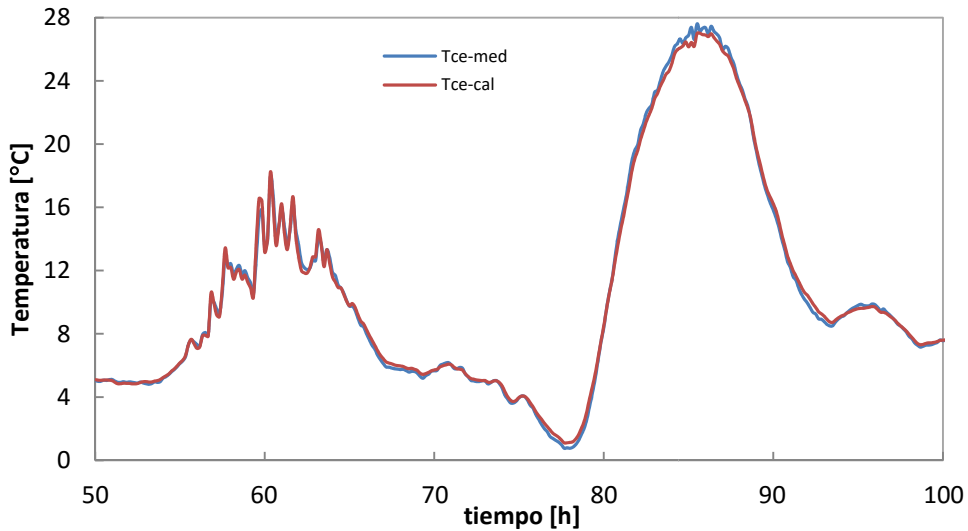


Figura 2.62– Detalle de la respuesta del modelo en el cálculo de la temperatura exterior del muro de calibración, para la rutina ROLBS

En el intervalo siguiente, correspondiente a un día despejado, es donde se producen las máximas desviaciones, dándose estos desajustes en los puntos nocturnos y en los puntos de máxima irradiancia solar. El error en las altas temperaturas se puede explicar como un efecto de la radiación solar sobre el sensor. Aunque las sondas Pt100 se instalan con pasta conductora, para asegurar un buen contacto con la superficie de la muestra, y se les coloca una cinta de baja emisividad en su superficie, para reducir el calentamiento propio de la sonda por la captación solar, como se comprueba con el modelo, este efecto no se consigue mitigar de forma completa. Este sobrecalentamiento no es superior a 1°C , como se puede ver en las desviaciones máximas de los residuos, y se produce en periodos cortos de tiempo, frente a la duración completa del ensayo y además representa un porcentaje pequeño respecto al resto de datos empleados para el estudio de la muestra. Por otro lado, las

desviaciones que se producen en las temperaturas bajas, correspondientes a periodos nocturnos, se pueden explicar mediante el intercambio radiativo de onda larga en las noches despejadas. Si se comparan la temperatura de superficie de la muestra y la temperatura de aire exterior, ver Figura 2.63, se observa cómo la superficie se enfría más que el ambiente exterior.

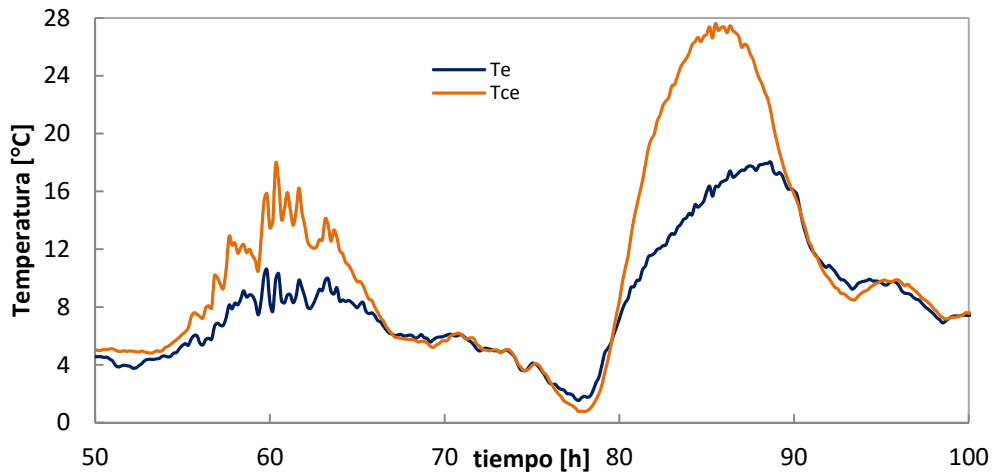


Figura 2.63– Evolución de la temperatura ambiente ventilada, T_e , y la temperatura superficial exterior, T_{ce} , del muro de calibración, para la rutina ROLBS

Estos efectos pueden ser corregidos, y mejorada la precisión de medida de las temperaturas superficiales, en futuras modificaciones y adaptaciones de la celda. El efecto de sobrecalentamiento de las sondas puede ser tratado con modelos adecuados que permiten ajustar adecuadamente las temperaturas reales de superficie, pero que por el momento, se salen del alcance de este trabajo. En cuanto al intercambio de onda larga, se puede cuantificar con el empleo de un pirgeómetro de precisión, que permita medir el flujo de calor perdido por la superficie de la muestra, e introducirlo como una componente más en el análisis del modelo. Debido a los aspectos planteados, se debe prestar especial atención a los ajustes de la temperatura superficial exterior, debido a su complejidad. Una forma de evaluar la validez del ajuste, es analizar los parámetros que se ven directamente afectados por la temperatura superficial. Estos parámetros son la apertura solar, A_{Gv} , y el coeficiente de intercambio de calor con el ambiente exterior, H_e .

$$H_e = h_c + h_r$$

$$h_c = 4 + 4v \quad [2.59]$$

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T_m^3$$

En el estudio de identificación de parámetros, para la rutina ROLBS, se obtiene un valor de apertura solar de $A_{Gv} = 0,298$. Este resultado es coherente, teniendo en cuenta que la superficie exterior del muro de calibración está pintada de color blanco, y según documentación^[405], superficies con esta tonalidad presentan absorptividades en longitudes de onda corta entre $0,2 < \varepsilon < 0,5$, para tonalidades que van del blanco puro a colores claros. En el caso del coeficiente de intercambio de calor con el ambiente exterior, se obtiene un valor de $H_e = 21,098 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Para evaluar este resultado, se toma como referencia el modelo normalizado para el cálculo de la resistencia superficial exterior en edificación^[19], ver [2.59]. Donde T_m es la temperatura media de la

superficie y su entorno. En este modelo simple, el coeficiente de convección se determina en función de la velocidad del aire, y el coeficiente de radiación se obtiene mediante la aproximación [2.60], la cual comete un error inferior al $e < 0,02\%$, para el rango de temperaturas ambientales de trabajo.

$$(T_{sc}^4 - T_e^4) \cong 4T_m^3 \cdot (T_{sc} - T_e)$$

$$e = \frac{2 \cdot (T_{sc} - T_e)}{T_m^2} \quad [2.60]$$

Para el periodo de ensayo, la velocidad media de viento registrada es de $v = 2,6$ [m/s], y la temperatura media de radiación es de $T_m = 282,7$ [K]. Tomando una emisividad de la superficie de $\varepsilon = 0,3$, en base a los valores obtenidos de la apertura solar, se obtiene una estimación para el coeficiente de transferencia de calor exterior de $H_e \approx 16$ [W/m²K], por lo que, los valores obtenidos en el modelo son razonables. Una vez evaluados los valores en sí de los parámetros afectados por la temperatura superficial, un aspecto muy importante, es evaluar la correlación entre ambos, ya que son dos parámetros totalmente asociados. En el modelo, el coeficiente de correlación obtenido es de $COR_{H_e-A_{Gv}} = 0,194$, alejado de la unidad, por lo que no existe interrelación entre los valores obtenidos, y el modelo se considera válido. Los resultados obtenidos en la evaluación del modelo de muro de calibración, para el conjunto de rutinas empleadas en los ensayos, permite tomar como válidos los resultados, aun teniendo en cuenta las limitaciones indicadas anteriormente. En la Tabla 2.16 se muestran los valores finales obtenidos.

	centro		borde		A _{Gv} [-]	H _{ce} [MJ/K]
	H [W/K]	C [W/m ² K]	H [MJ/K]	C [MJ/m ² K]		
PULSO	0.215	0.064	0.625	0.266	0.321	19.545
PRBS	0.196	0.084	0.648	0.285	0.265	22.986
ROLBS	0.224	0.063	0.633	0.245	0.298	21.098
medio	0.212	0.070	0.635	0.265	0.295	21.210
σ	0.014	0.012	0.012	0.020	0.028	1.723
ref	0.205	0.076	0.605	0.270		
Dif [%]	3.1	-8.0	4.9	-1.8		

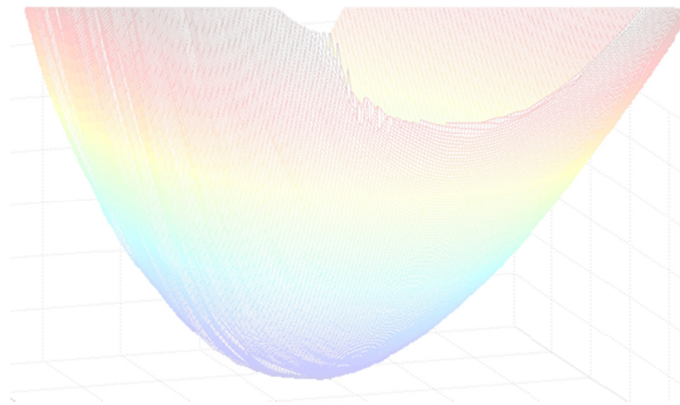
Tabla 2.16 – Resultados finales del estudio de caracterización del muro de calibración

Este estudio es el paso final en el proceso de calibración de la celda. Se verifica como las pautas generales del ensayo *PASLINK* y su aplicación y puesta a punto en la celda *EGUZKI*, permiten caracterizar adecuadamente las propiedades térmicas de las probetas bajo estudio. Las condiciones homogéneas de la sala de ensayo, la medición adecuada de los flujos de calor intercambiados por la envolvente de la celda, la rutina de ensayo, y los modelos y herramientas de identificación de parámetros generan resultados fiables. En el muro de calibración se observa cómo la desviación en la medida de la transmitancia es inferior al 3%, y cómo se estiman adecuadamente los efectos de borde inherentes a toda instalación de ensayos. En cuanto a la determinación de la capacidad térmica, parámetro complejo de medir, los resultados presentan diferencias inferiores al 10%, incluso en una muestra tan compleja de caracterizar como es el muro de calibración, de poca capacidad térmica y mucho aislamiento. Además, el ensayo permite determinar de forma fiable otros parámetros fundamentales para el estudio del comportamiento térmico de las soluciones de

fachada, como es la apertura solar y el coeficiente de intercambio de calor superficial exterior. Aunque el estudio del muro de calibración ha dado resultados positivos, siendo una muestra muy compleja de caracterizar, por otro lado, también se trata de una situación muy controlada. En el resto de ensayos no se puede disponer de una información de contraste tan fiable respecto a los flujos de calor intercambiados por la muestra. Por esta razón, antes de continuar con los ensayos de muestras de fachadas ventiladas, se realiza un ensayo de trazabilidad, denominado *IQ-Test*, que permite contrastar y definir con mayor precisión la incertidumbre de caracterización térmica de la metodología experimental de ensayo.

Capítulo 3

Ensayo de trazabilidad IQ-Test





3.1 Ensayo de trazabilidad IQ-Test

En todo proceso de estudio experimental es necesario complementar los resultados de las medidas y ensayos con la incertidumbre que acompaña a los mismos, para así poder tomar decisiones de su validez y del rango de aplicación. Entendiendo el concepto de incertidumbre como una cuantificación de la calidad del resultado indicado, y como una herramienta fundamental para la declaración de conformidad con respecto a unas especificaciones o procedimientos. El proceso de medida se estudia de forma que se identifique el máximo número de causas de error, controlando sus valores por debajo de un límite admisible, y trasladando su efecto en la expresión de la incertidumbre del resultado. En la Figura 3.1 se muestra el diagrama causa-efecto en el procedimiento *PASLINK*. En dicho diagrama se recogen el conjunto de fuentes que participan de la incertidumbre del ensayo.

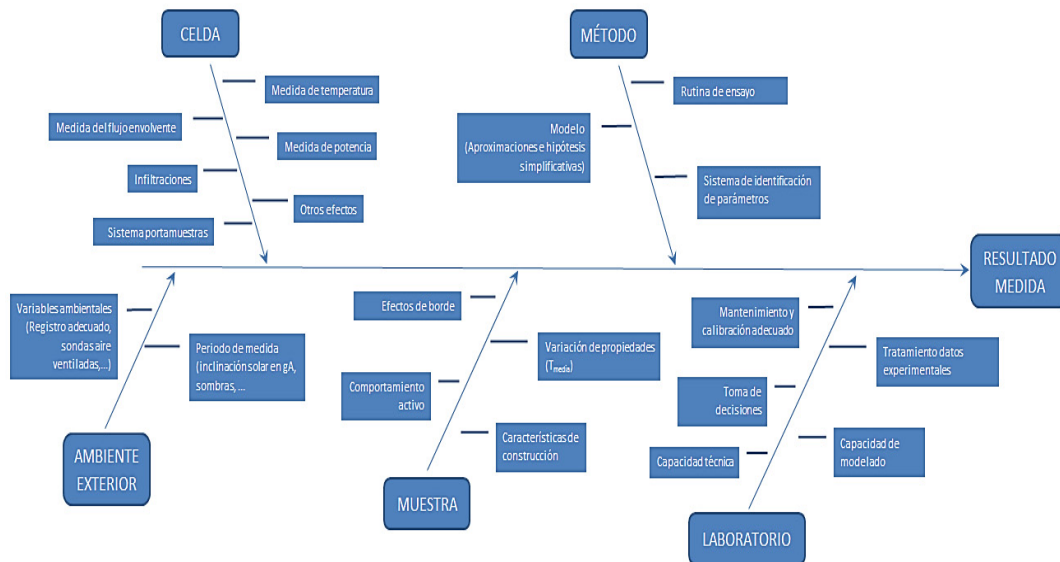


Figura 3.1 – Análisis de factores del procedimiento de ensayo *PASLINK*

La estimación de una incertidumbre asociada a una metodología de ensayo exige la evaluación tanto de los aspectos técnicos como de los organizativos. Es decir, los procesos técnicos de ensayo deben estar correctamente definidos y su alcance debe cubrir todo el ámbito del experimento, y los resultados deben verificarse en el conjunto de centros que llevan a cabo dicho ensayo. Un proceso de ensayo, como es el procedimiento *PASLINK*, requiere medios de medida, cuya incertidumbre se acota perfectamente mediante una correcta calibración^[270, 271], pero también requiere de subprocesos, como es el caso de los métodos de identificación de parámetros, cuya incertidumbre es más compleja de definir. A esto hay que añadir la interrelación entre ambas partes, es decir, cómo se traslada el error de medida de cada componente registrada por un instrumento a la incertidumbre final en la estimación de la propiedad de la muestra obtenida mediante los métodos de identificación. Además de la incertidumbre asociada a la instrumentación, hay que tener en cuenta que las condiciones de medida o de ensayo también tienen influencia sobre la determinación de la magnitud en estudio. Estas condiciones forman parte íntegra del método de medida o de ensayo, y deben estar claramente especificadas cuando se hace referencia a una incertidumbre dada, ya que la obtención de resultados reproducibles está condicionada por la necesidad de una definición, cuanto más detallada mejor, del

método de ensayo. Por esta razón, la red PASLINK dispone de unas guías de ensayo muy bien definidas, que contienen y acotan todos los aspectos que pueden influir en el resultado de ensayo [2,366,377].

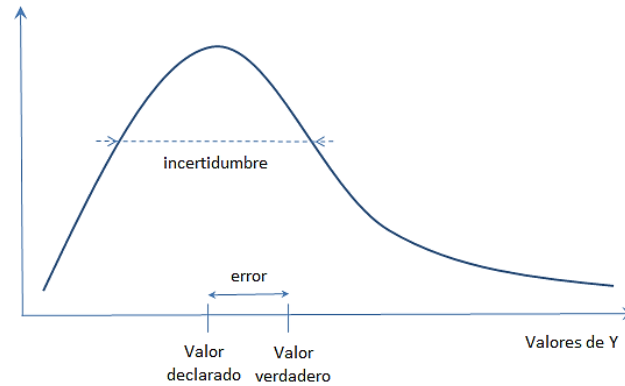


Figura 3.2 – Definición gráfica del concepto de error e incertidumbre

Para calcular la incertidumbre propia del ensayo, según indica la guía GUM^[84,217], es necesario disponer de una descripción completa del modelo y control de las distintas componentes de la incertidumbre para realizar un estudio de propagación. De esta forma, según la guía, un resultado debe ir acompañado de los errores sistemáticos y aleatorios asociados al ensayo y al método, según la ecuación [3.1].

$$Y_{\text{declarado}} = Y_{\text{verdadero}} + e_{\text{sistemático}} + e_{\text{aleatorio}} \quad [3.161]$$

La forma de controlar los errores sistemáticos del ensayo se basa en realizar las siguientes actuaciones:

- Calibración de la instrumentación
- Control de las infiltraciones
- Reducido aporte de las componentes no medidas del intercambio de energía en el ensayo
- Otros aspectos...

En cuanto a la componente de error aleatorio, ésta proviene de variaciones temporales y espaciales no previsible o estocásticas de las magnitudes de influencia. Para el control de esta componente la única actuación posible consiste en repetir las observaciones. Una vez acotada la incertidumbre de las variables medidas, el siguiente paso consiste en determinar la contribución de cada una de las incertidumbres de entrada en la incertidumbre del resultado. Para poder realizar este análisis es necesario disponer de la función [3.2], que relaciona el resultado con los parámetros de entrada.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad [3.262]$$

A través de dicha función se puede estimar la varianza del resultado mediante el desarrollo de Taylor según la ecuación [3.3].

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n u(x_i, x_j) \quad [3.3]$$

En el desarrollo se desprecian los términos de segundo orden, y analizando su contenido, se obtiene que las derivadas parciales del primer término representan los coeficientes de sensibilidad del resultado frente a las diferentes magnitudes de entrada, y el segundo término representa la correlación entre magnitudes. Como en el ensayo *PASLINK* las distintas magnitudes son independientes, los términos de covarianza correspondientes a las correlaciones son nulos, de forma que, la expresión se puede simplificar según la ecuación [3.4], donde los c_i se definen como coeficientes de sensibilidad.

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) \quad [3.463]$$

El cálculo de la incertidumbre analítica, según indica la guía *GUM*, es compleja de aplicar o incluso imposible en el ensayo experimental en algunas ocasiones, como es el caso del proceso *PASLINK*, ya que no se dispone de una función explícita para reflejar la relación [3.2]. En nuestro caso, el resultado final, Y_{ensayo} , se obtiene de los métodos de identificación de parámetros. Por otro lado, este aspecto se ha resuelto en las propias herramientas de identificación. *LORD* incluye un módulo de propagación de errores que determina los coeficientes de sensibilidad, c_i , para cada una de las variables de entrada, y mediante la indicación de la incertidumbre de cada una de las medidas, u_i , determina la propagación en la incertidumbre final del resultado, aplicando la aproximación [3.5].

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Y}{\Delta x_i} \Delta x_i \quad [3.5]$$

La herramienta *LORD*, como se indica en el apartado 2.3.1.1, dispone de un módulo de *Monte-Carlo* que permite estimar la variación en el resultado ΔY en función de la variación en la magnitud de entrada Δx_i , generando de forma aleatoria resultados de ajuste para oscilaciones de la variable de entrada. Este método, aunque fiable y robusto, es muy lento y exige un amplio periodo de cálculo para obtener la incertidumbre global del resultado. En el caso de la herramienta *CTSM*, el propio sistema de modelado estocástico contempla la incertidumbre de cada una de las entradas, ver apartado 2.3.1.2. En la definición del modelo se introduce una componente de error de medida, que presenta una distribución gaussiana, de forma que la incertidumbre final del resultado que se obtiene ya engloba el efecto de las incertidumbres de las variables de entrada. Esta metodología presenta un comportamiento ágil y rápido en su aplicación y permite un contraste de resultados, mediante la comprobación de que la varianza de cada variable de entrada al modelo, σ_i , es inferior a la varianza asociada a la incertidumbre del parámetro asociado. El desarrollo experimental del estudio de incertidumbres del ensayo que se indica puede verse con más detalle en el apartado 3.4. Además de las características del equipo, las condiciones de medida y ensayo también tienen influencia sobre la determinación de la magnitud en estudio. Estas condiciones forman parte íntegra del método de medida o de ensayo y deben especificarse claramente cuando se hace referencia a una incertidumbre dada. Establecer la calidad de un método de ensayo mediante la valoración de su exactitud, considerando el efecto de las condiciones de medida, es algo esencial. Los dos indicadores que constituyen la exactitud: la veracidad y la precisión; permiten, el primero, saber si el método presenta un sesgo con respecto a un valor verdadero, y el segundo, saber si el método proporciona resultados comparables cuando se realizan repeticiones en condiciones diferentes, reproducibilidad. La cuantificación de la exactitud del método se obtiene mediante la realización de un

interlaboratorios, siguiendo un protocolo definido, en el marco de un objetivo concreto, como define la norma *ISO 5725*^[84]. Este estudio permite caracterizar el efecto del laboratorio, operador, equipos de ensayo, tiempo, condiciones ambientales... Como se muestra en la Figura 3.3 el ensayo interlaboratorios permite determinar mediante un estudio estadístico la calidad global del método de ensayo.

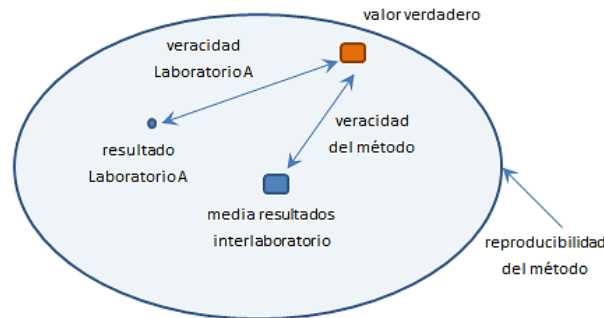


Figura 3.3 – Características del ensayo interlaboratorios

La realización de un estudio interlaboratorios es fundamental para determinar la veracidad del método, que se define como el grado de concordancia existente entre el valor medio obtenido de una gran serie de ensayos y un valor verdadero, o uno aceptado como referencia, y la precisión, que se define como el grado de concordancia entre resultados de ensayos independientes obtenidos en las condiciones estipuladas.

CENTRO	RESPONSABLE	PAÍS
BBRI	GillesFlamant	Bélgica
BRE	Paul Baker	Escocia
CIEMAT	María José Jiménez	España
CRES	Andreas Androutsopoulos	Grecia
EMPA	Hans Simmler	Suiza
FGTUP	Eduardo Maldonado	Portugal
JRC	Hans Bloem	Italia
TNO	Dick van Dijk	Holanda
UoBCottbus	Olaf Gutschker	Alemania
VTT	Ismo Heimonen	Finlandia

Tabla 3.1 – Centros participantes en el ensayo interlaboratorios IQ-Test

Por todo lo anterior, en el año 2000 la red *PASLINK* planteó la realización de un ensayo interlaboratorios, denominado *IQ-Test (Improvement Quality Test)*^[21], en el que participaron los centros indicados en la Tabla 3.1. Los resultados del estudio se publicaron en el documento desarrollado por *Baker P.*^[84]. Aprovechando la calidad de este estudio interlaboratorio, como paso previo a la realización de los ensayos experimentales de fachadas ventiladas, se ha realizado el ensayo de *IQ-Test*, para verificar el estado de la celda *EGUZKI* y los medios técnicos y personales de las instalaciones del Área Térmica frente al conjunto de componentes de la red *PASLINK*.

3.2 Metodología del ensayo de trazabilidad

En todo ensayo interlaboratorios es necesario definir con cuidado y de la forma más completa posible el componente y los procedimientos de ensayo, ya que si no, se introduce una componente de indefinición, que genera una incertidumbre adicional sobre el resultado de medida. Usualmente, en los ensayos de interlaboratorios la muestra bajo estudio es la misma y circula a través de los centros participantes, pero en el caso de los ensayos *PASLINK*, por el tamaño y características de las muestras, este procedimiento presenta grandes problemas. Este es un punto importante que se tuvo en cuenta a la hora de definir las probetas de trabajo. El ensayo *IQ-Test* se configuró en base a poder ser ejecutado en centros que abarcaban la geografía completa de Europa y en un periodo de tiempo razonable, que permitiese analizar los siguientes aspectos:

- características particulares de cada celda del grupo *PASLINK*, como es el caso de los efectos de borde, tamaño de muestra, etc...
- asegurar que las propiedades de cada componente de estudio eran comparables,
- calidad de los datos experimentales y capacidad de cada centro en el tratamiento de los mismos y modelo de muestras
- obtención de las propiedades básicas de estudio en muestras, como son la transmitancia de muros opacos y el factor solar de ventanas,
- validez de los procedimientos de ensayo, en lo relativo a configuración y duración de las rutinas.

Con estas premisas se definen, tanto las características de las probetas, como los procedimientos de ensayo, según se indica en los siguientes apartados.

3.2.1 Descripción de la muestra

La muestra de ensayo está formada por dos componentes. El primero consiste en un muro opaco homogéneo cuya parte central es desmontable, de forma que se pueda colocar el segundo componente, que se trata de una ventana de referencia. El primer componente es el que presenta mayores complicaciones respecto a los requisitos de una muestra interlaboratorios, ya que es muy complejo circular un elemento de las dimensiones de las muestras *PASLINK* entre los centros participantes. Por esta razón se configuró para poder ser construido en cada laboratorio sin introducir variabilidad entre muestras. El primer componente está formado por un núcleo de *EPS* de densidad $\rho = 30$ [kg/m³], con una conductividad controlada de $\lambda = 0,033$ [W/mK]. El aislante se reviste con madera contrachapada de un espesor $e = 12$ [mm] por las caras interior y exterior. El acabado final exterior debe ser de pintura fenólica de color blanco que actúe como impermeabilizante y protector de la muestra. En la zona central se debe disponer de una pieza desmontable de dimensiones 1,25 x 1,50 [m]. En la Figura 3.4 se muestra un esquema de la configuración del primer componente. Como instrumentación obligatoria en el estudio de interlaboratorios, se pide la colocación de dos perfiles de temperatura en la muestra. Un perfil situado en el centro del componente, que mediría el comportamiento unidimensional de transmisión de calor, el perfil A, y un segundo perfil situado en el anillo perimétrico, perfil B, que permite analizar los efectos de borde. Además de la temperatura, se debe medir el flujo en la cara interior de la muestra, entre el panel de contrachapado y el material aislante. En la Figura 3.5 se muestra un esquema de colocación de los instrumentos de medida. Las exigencias mínimas del ensayo *IQ-Test* consisten en la instalación de los perfiles de

temperatura A y B, junto con la colocación de un sensor de flujo de calor en la cara interior, correspondiente a la *capa 6*. En el ensayo realizado en EGUZKI se ha instalado un perfil más de temperatura, situado en el punto C, correspondiente a la esquina inferior izquierda, centrado respecto a la zona central desmontable y a la zona perimetral. También se ha colocado un sensor de flujo de calor más, situado en la *capa 2* del perfil A, que aporta una información útil para realizar contrastes de los modelos. Y finalmente, para analizar los planos de temperatura en la muestra completa, se han colocado 6 sondas de temperatura superficial más, en las *capas 2, 4 y 6*, como se muestra en la Figura 3.4. En total, la muestra dispone de 24 sondas de temperatura y 4 sensores de flujo de calor, colocados en el interior del primer componente.

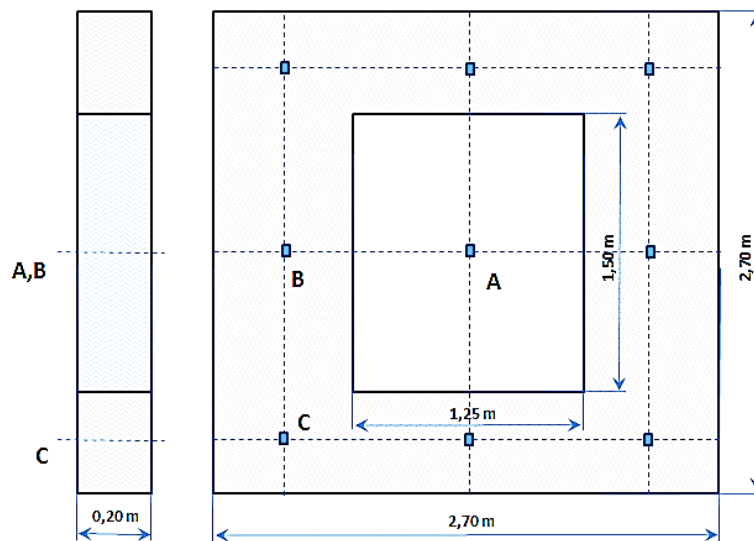


Figura 3.4 – Esquema constructivo del primer componente

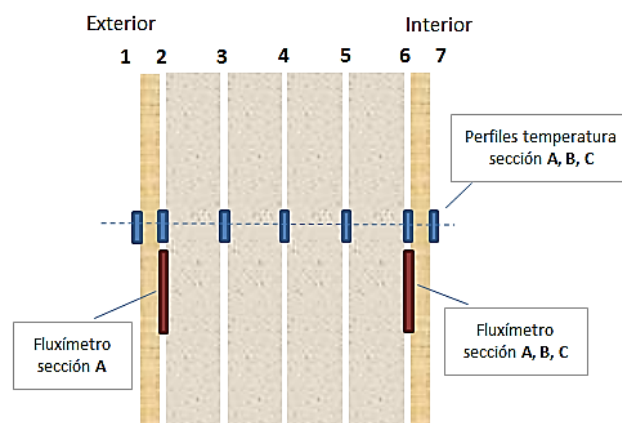


Figura 3.5 – Esquema de instalación de sondas en el primer componente

En la Figura 3.6 se muestra el proceso de fabricación de la parte perimetral del primer componente. El núcleo se ha configurado mediante planchas de EPS de espesor $e = 10$ [cm], colocadas a contrajuntas. En la imagen de la izquierda se puede apreciar las zonas del perímetro en las que se colocan los perfiles B y C de medida. En la imagen de la derecha de la Figura 3.6 se aprecia el resultado final con el revestimiento de contrachapado, antes de aplicar la capa de pintura blanca protectora. En la Figura 3.7

se muestra la zona central del muro opaco durante su fabricación, imagen de la izquierda, y el montaje final de ambas partes en la celda EGUZKI, imagen de la derecha, en la que se puede apreciar el acabado de la cara exterior.



Figura 3.6 – Montaje de la parte exterior del primer componente, que sirve de base a la ventana del segundo componente



Figura 3.7 – Fabricación pieza zona central del muro opaco y montaje en la celda del primer componente

El segundo componente es una ventana de doble vidrio, de 4 [mm] de espesor, y una cámara de aire de 20 [mm] de anchura, con un sencillo perfil de madera. En la Figura 3.8 se muestra el esquema constructivo. En la cámara de aire se introduce material absorbente de humedad, para evitar condensaciones durante el ensayo. La unión entre los vidrios y el perfil de madera se realiza mediante un cordón de silicona, y se remata perimetralmente con un junquillo de madera. La junta exterior del junquillo se sella con un segundo cordón externo de silicona. La selección de materiales y construcción de la muestra se realiza en cada uno de los centros participantes. El emplear una ventana como componente de un estudio interlaboratorio es complejo, ya que es complicado conseguir que todas las probetas presenten las mismas propiedades térmicas. De cara a minimizar la variabilidad entre probetas se seleccionó un perfil de madera simple, y los vidrios se enviaron al BBRI, (*Belgian Building Research Institute*)^[1], para medir sus propiedades térmicas y comportamiento espectral frente a la radiación solar, según la norma EN 410^[21], ver Tabla 3.2.

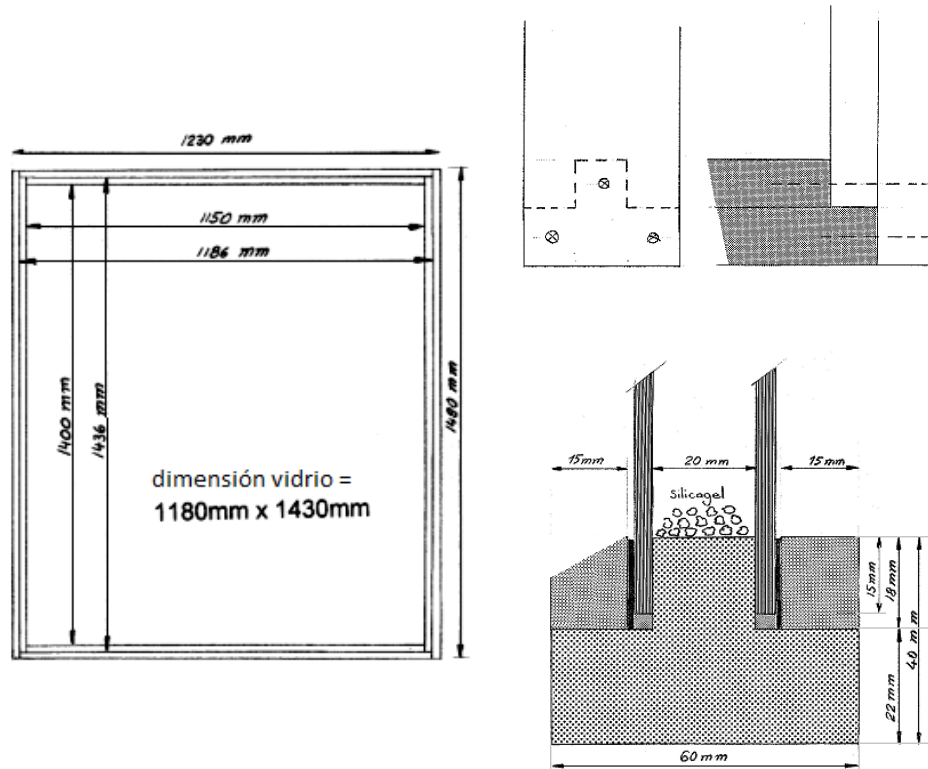


Figura 3.8 – Configuración de la ventana correspondiente al segundo componente del estudio IQ-Test

CENTRO	τ_e [%]	ρ_e [%]	α_e [%]	τ_v [%]	ρ_v [%]	τ_{uv} [%]
BBRI	84.1	8.0	7.9	89.6	8.4	64.3
BRE	81.6	7.8	10.6	89.2	8.3	57.7
CIEMAT	83.0	7.9	9.1	89.3	8.3	59.2
CRES	80.6	7.7	11.7	88.8	8.3	57.1
EMPA	84.4	8.1	7.5	89.8	8.5	61.9
FGTUP	83.0	7.7	9.3	89.7	8.1	59.9
JRC	80.3	7.5	12.2	89.2	8.1	57.7
TNO	83.9	8.0	8.1	89.9	8.4	61.7
UoBCottbus	83.8	7.9	8.3	89.8	8.2	63.3
VTT	84.5	7.9	7.6	90.2	8.3	67.5
Min	80.3	7.5	7.5	88.8	8.1	57.1
Max	84.5	8.1	12.2	90.2	8.5	67.5
Media	82.9	7.9	9.2	89.6	8.3	61.0

Tabla 3.2 – Propiedades espectrales de los vidrios de la ventana del IQ-Test de cada centro participante, medidas en el BBRI

En la Tabla 3.2 se puede apreciar diferencias representativas en las propiedades, principalmente en el coeficiente de transmisión en el espectro ultravioleta, en el que se presenta un valor mínimo de $\tau_{uv} = 0,571$, correspondiente al CRES, y un valor máximo de $\tau_{uv} = 0,675$, correspondiente al VTT. Las diferencias son menores para el coeficiente de transmisión en el espectro visible e infrarrojo. En cuanto a los coeficientes de reflexión y absorción, toman valores que se pueden considerar homogéneos. En la Figura 3.9 se

muestra, como ejemplo, las curvas medias y el rango de 2σ de los coeficientes de transmisión y reflexión, para el conjunto de vidrios. Mediante la herramienta *WIS*, (*Window Information System*), desarrollada por el *TNO*, se analizó el efecto sobre el factor solar de las ventanas patrón, para la configuración de doble hoja, de la variación de las propiedades de transmisión de cada uno de los vidrios, obteniéndose un rango entre $g = 0,73$, para el *JRC*, y $g = 0,77$, para el *VTT*. Estas características, y otras, propias a las condiciones de ensayo en cada centro, hacen que el estudio de los resultados del segundo componente sea más complejo de evaluar como estudio de interlaboratorio. Para el ensayo realizado en la celda *EGUZKI* se ha podido disponer de la ventana del *JRC*, gracias a la colaboración prestada por J.J. Bloem al desarrollo de las celdas *PASLINK* del *AT* del *LCCE*. En la Figura 3.10 se muestra la recepción de la ventana y el cambio de las sales secantes, ya que las originales habían perdido sus prestaciones por envejecimiento. También se puede observar el sellado de los vidrios y la colocación de los junquillos.

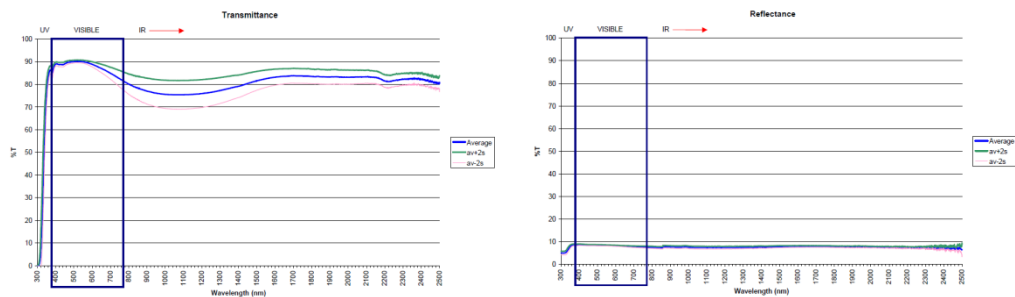


Figura 3.9 – Valor medio del coeficiente de transmisión y reflexión y rango 2σ para el conjunto de vidrios de los diferentes centros del estudio *IQ-Test* [8, 9]

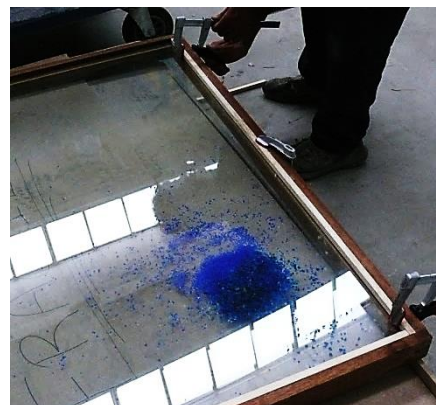


Figura 3.10 – Recepción de la ventana del *JRC*, cambio de las sales secantes de la cámara de aire, y sellado y colocación de los junquillos



Figura 3.11 – Desmontaje de la zona central del muro opaco correspondiente al primer componente del ensayo IQ-Test

Una vez acondicionada la ventana, en la Figura 3.11 se muestra el proceso de colocación en la celda. Empleando una elevadora mecánica, para soportar el peso, se extrae el componente central. En la imagen de la derecha se aprecia cómo queda el componente base, desde el interior de la sala de ensayos. Por indicaciones del ensayo interlaboratorio, la ventana debe colocarse a ras de la cara exterior del hueco dejado en el muro opaco, ver Figura 3.12. De esta forma se elimina el efecto de sombra del hueco portante, mejorando la precisión de medida del factor solar. Pero, por otro lado, esta disposición de la ventana puede tener efectos en la medida de la transmitancia, debido a un mayor efecto de borde del componente base. Eso se debe analizar detenidamente a la hora de evaluar los resultados de los modelos de identificación de parámetros.



Figura 3.12 – Detalle de la colocación de la ventana a ras de la cara exterior del hueco del muro opaco

Por la cara interior, se coloca una cortina de color negro a una distancia de 20 [cm] del componente, ver Figura 3.13. De esta forma, se evita que produzca incidencia directa de radiación sobre la superficie de las *tiles*. Si no se evitase este efecto se daría lugar a un sobrecalentamiento de las *tiles*, lo que implicaría un componente adicional de error en la medida del flujo de calor de la envolvente. Además, al elevarse la temperatura de la superficie de las *tiles*, habría que sumar al intercambio convectivo de calor el intercambio por radiación entre superficies, lo que complica el modelado de la sala de ensayos. Gracias a la cortina de color negro, toda la radiación que atraviesa la ventana se acumula en el interior de la sala de ensayos, intercambiándose con el ambiente de la misma por convección.



Figura 3.13 – Sellado exterior de las juntas, izquierda, y cortina en la cara interior, derecha

En la Figura 3.14 se muestra el acabado final del muro opaco con la ventana durante el proceso de ensayo. Se han realizado dos ensayos completos del procedimiento definido en el estudio *IQ-Test*. En el primer ensayo se ha situado el muro opaco, correspondiente al primer componente, al borde del portamuestras de la celda. Esta elección cumplía los mismos requisitos que los planteados para la colocación de la ventana sobre el hueco del muro base. De esta forma se eliminan las sombras generadas por el borde saliente del portamuestras sobre el muro bajo estudio, pero se aumentan los efectos de borde. Este segundo efecto, presenta una mayor incidencia sobre los resultados, como se puede ver en el apartado 3.5. Por esta razón, se lleva a cabo un segundo ensayo situando el muro opaco al ras del interior. De esta manera se cuantificarán los efectos de borde de la muestra en comparación a los efectos del sombreamiento.

Una vez definidos los componentes bajo estudio, es fundamental definir claramente el procedimiento de ensayo y los resultados a obtener para acotar lo más posible el estudio interlaboratorio, de cara a obtener unos datos útiles para el análisis de la calidad del método *PASLINK*.

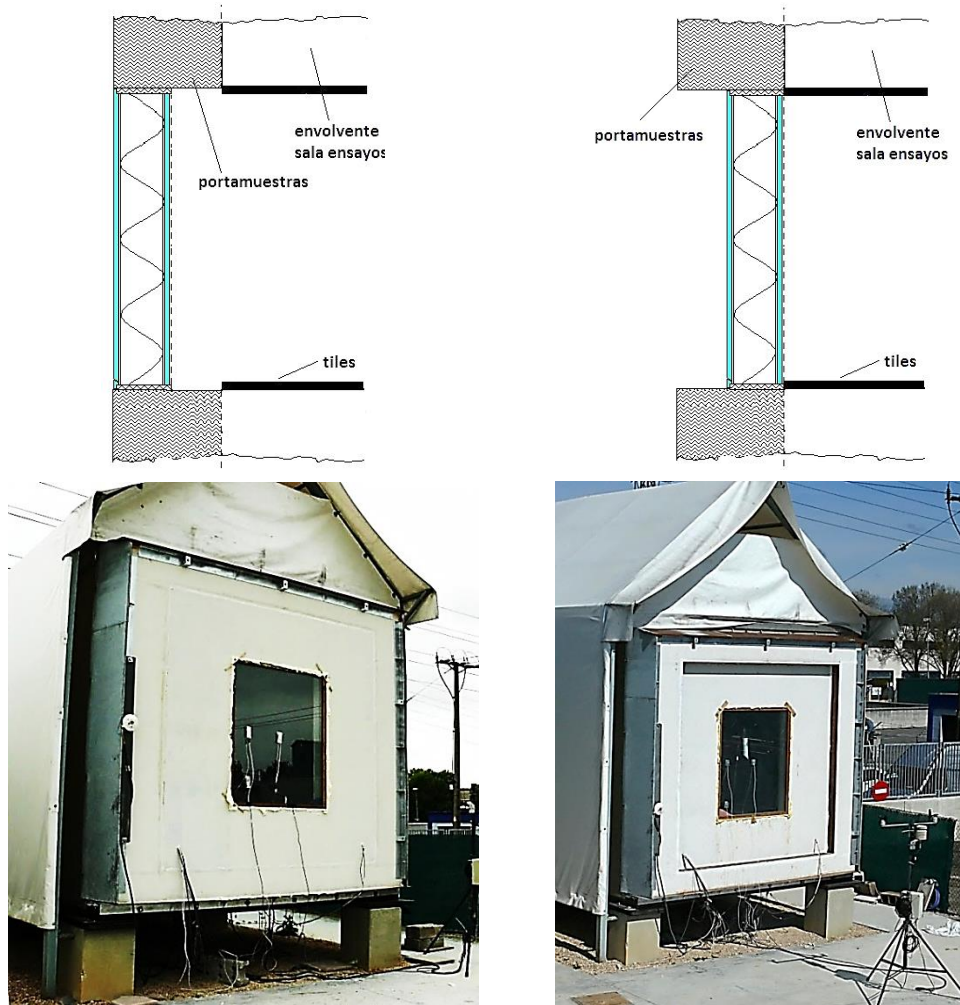


Figura 3.14 – Ensayo de la ventana del IQ-Test con el muro base colocado al borde exterior del portamuestras, izquierda, y colocado al borde interior, derecha

3.2.2 Procedimiento de ensayo

El objetivo del ensayo del primer componente, formado por el muro opaco, consiste en la medida de dos factores:

- determinar el valor de la transmitancia U_A [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] unidimensional, a través del flujo medido por fluxímetro situado en el eje central de la zona desmontable,
- determinar el valor total de transmitancia de la probeta, U_{opaco} [W/K], mediante el balance de energía aplicado a la sala de ensayos.

El análisis del valor unidimensional, U_A , permite evaluar la capacidad de cada centro en el modelado, ya que es un caso simple de muro homogéneo y ligero, y verificar que se dispone de un componente de idénticas características en todos los centros participantes. En cuanto al valor total del componente, U_{opaco} , permite comparar los valores de los efectos de borde en el conjunto de celdas. Respecto al ensayo del segundo componente, formado por la ventana montada sobre el perímetro del muro opaco, se busca determinar:

- el valor de transmitancia total UA_{total} [W/K], y el valor de la apertura solar gA [m^2], obtenidos mediante el balance de energía aplicado a la sala de ensayos,
- el valor de la transmitancia de la ventana U_V [W/m^2K], incluyendo los efectos de borde.

Teniendo en cuenta que se conoce la transmitancia del material que forma el muro opaco, y considerando que en toda la zona central desmontable, el flujo es unidimensional, se puede calcular la transmitancia de la ventana mediante la ecuación [3.6].

$$U_V = \frac{UA_{total} - (U_{opaco}A_{total} - U_A A)}{A} \quad [3.664]$$

Una vez definido el procedimiento de cálculo de los diferentes parámetros que se evalúan en el ensayo de interlaboratorio, es necesario concretar el método de análisis de la incertidumbre de dichos parámetros. Como primer paso, se acota el error de medida de cada uno de las variables, para el caso del ensayo del muro opaco. Los errores de medida a verificar son los indicados en la Tabla 3.3. Para el ensayo del segundo componente los errores de medida se indican en la Tabla 3.4. En este caso se considera un mayor error en la medida de la temperatura de la sala de ensayo ya que, debido al efecto de la radiación solar, la homogeneidad de la temperatura será peor. Con los errores de medida acotados, la incertidumbre de los parámetros de cálculo se determina aplicando la propagación de errores mediante las herramientas de identificación de parámetros, según se ha indicado en el apartado 3.1, mediante la expresión [3.5].

Variable	Descripción	Error
Qhfs	Flujo de calor que intercambia la envolvente de la sala de ensayos (corregido por el factor de calibración)	2%
Qhe	Potencia total introducida en la sala de ensayos	0,3%
Gv	Radiación solar global vertical, incidente sobre el plano del componente	5%
Text	Temperatura de aire exterior, ventilada	0,5K
Ttr	Temperatura media de la sala de ensayos	0,3K
IQAT01	Temperatura superficial interior del muro en el Perfil A	0,5K
IQAT04	Temperatura superficial intermedia del muro en el Perfil A	0,5K
IQAT07	Temperatura superficial exterior del muro en el Perfil A	0,5K
IQHF_A	Medida del flujo en la superficie interior del muro en el Perfil A	5%

Tabla 3.3 – Errores de medida de las variables en el ensayo del muro opaco

Variable	Descripción	Error
Qhfs	Flujo de calor que intercambia la envolvente de la sala de ensayos (corregido por el factor de calibración)	2%
Qhe	Potencia total introducida en la sala de ensayos	0,3%
Gv	Radiación solar global vertical, incidente sobre el plano del componente	5%
Text	Temperatura de aire exterior, ventilada	0,5K
Ttr	Temperatura media de la sala de ensayos	0,4K

Tabla 3.4 – Errores de medida de las variables ensayo del segundo componente, ventana y perímetro opaco

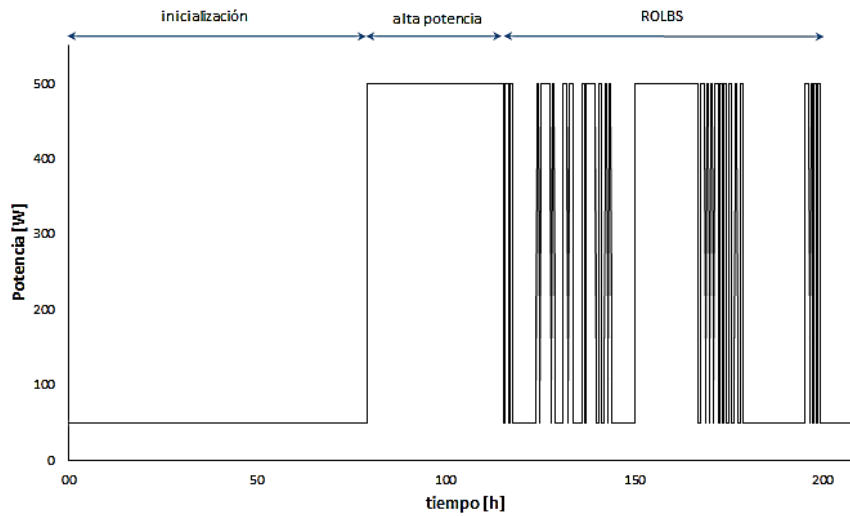


Figura 3.15 – Características de la rutina ROLBS empleada para el ensayo IQ-Test

Por último, para acotar todos los ámbitos del interlaboratorio, faltaría por definir el procedimiento de ensayo. Se decide emplear la rutina ROLBS, formada por 72 [h] de inicialización, en los que únicamente se introduce la potencia del ventilador, seguidos de 36 [h] con potencia constante de la resistencia eléctrica, y posteriormente el periodo aleatorio de alta frecuencia que dura 84 [h], ver Figura 3.15. Esta rutina se ha definido de forma que se obtenga la máxima información del ensayo, válida para realizar un proceso de identificación de parámetros óptima, con la menor duración de tiempo del mismo. Los ROLBS están configurados de forma que representan las frecuencias fundamentales de excitación a las que está sometida la envolvente de un edificio. Estas frecuencias están repartidas de forma equilibrada a intervalos logarítmicos uniformes, ordenados de forma cuasi-aleatoria. El realizar el estudio interlaboratorio con esta rutina permite verificar si se alcanza el objetivo planteado con la rutina diseñada. Por último, queda por calcular la potencia nominal de calefacción para que no se supere el límite operacional de seguridad de la sala de ensayos, $T_{se} = 45$ [°C], que se puede aproximar mediante el balance de energía de la sala de ensayos, ecuación [3.7].

$$P = [(UA + UA_{env}) \cdot (T_{se}^{max} - T_e)] - (gA \cdot G_v) \quad [3.7]$$

$$T_{se}^* = T_e + \frac{(gA \cdot G_v) + P_{vent}}{(UA + UA_{se})} \quad [3.8]$$

Tomando los datos climáticos del año tipo de Vitoria-Gasteiz, se tiene una temperatura media anual de ambiente exterior de $T_e = 11$ [°C], y una radiación incidente sobre superficie vertical $G_v = 165$ [W/m²]. Teniendo en cuenta que la potencia del ventilador es de $P_{vent} = 40$ [W], la transmitancia de la envolvente de la sala de ensayos es de $UA_{env} = 5,348$ [W/K], y las propiedades de los componentes son: $UA = 1,24$ [W/K], para el primer componente, $UA = 5,89$ [W/K] y $gA = 1,2$ [m²], para el segundo componente; se obtiene que los valores de potencia oscilan entre $P = 225$ [W], para el ensayo del muro opaco, y $P = 265$ [W], para el ensayo del segundo componente con la ventana. Como unificación de criterios en el ensayo interlaboratorio se decide emplear una potencia común en todos los centros participantes de $P = 250$ [W] para los dos ensayos. Una vez definida la potencia, es necesario verificar que el salto de temperatura entre ambientes supera los $(T_{se} - T_e) \geq 10$ K. Para ello es necesario determinar la temperatura libre que

alcanzaría la sala de ensayos sin potencia de calefacción, únicamente con la introducida por el ventilador. Aplicando el mismo balance de energía empleado, se puede despejar dicha temperatura, ecuación [3.8]. Se obtiene un valor de temperatura libre de la sala de ensayos de $T_{se}^* = 32,3$ °C y $T_{se}^* = 17,1$ °C, para el primer y segundo componente. De forma que el salto de temperatura entre la sala de ensayos y el exterior oscilará entre $21,3 \leq (T_{se} - T_e) \leq 34$ °C, para el muro opaco, y $6,1 \leq (T_{se} - T_e) \leq 34$ °C, para el segundo componente. Lo que corresponde con un salto medio de $\Delta T = 27,7$ °C y $\Delta T_m = 20,1$ °C, respectivamente. Definido el ámbito y configuración del interlaboratorio *IQ-Test*, se muestra a continuación los datos experimentales obtenidos durante los diferentes ensayos realizados en la celda *EGUZKI*.

3.3 Datos experimentales

Como se ha indicado anteriormente, se han realizado dos ensayos completos de *IQ-Test*, muro opaco y muro más ventana. El primero se realizó con el primer componente colocado al borde de la cara exterior del sistema portamuestras. Y se llevó a cabo entre el 31 de julio y el 19 de agosto del 2010. Con la experiencia adquirida en este primer estudio, se repitieron los ensayos colocando el muro opaco al borde interior, y ampliando la instrumentación de medida para caracterizar, por ejemplo, la temperatura de la capa de aire entre la cortina y la ventana durante el ensayo del segundo componente. El segundo estudio de *IQ-Test* se realizó entre el 25 de febrero y el 22 de marzo del 2011. Esto también permite evaluar los efectos de las condiciones climáticas sobre los resultados, al disponer de datos en las condiciones extremas de trabajo, correspondientes al verano e invierno. A continuación se analizan los datos experimentales obtenidos durante los diferentes ensayos, de cara a validarlos para el análisis posterior de identificación de parámetros.

3.3.1 Muro opaco

En la fase experimental es necesario evaluar las condiciones ambientales bajo las que se ha realizado el ensayo, debiendo presentar una variabilidad representativa. A continuación, se debe verificar el correcto funcionamiento de la celda, a través de los parámetros de la sala de ensayo. Y por último, se pasa a estudiar los datos de la instrumentación propia de la muestra. En la Figura 3.16 y en la Figura 3.17 se muestra la presión barométrica, humedad relativa, precipitación, velocidad de viento y radiación solar, tanto sobre superficie horizontal como sobre la superficie vertical de la muestra. Se puede observar cómo las condiciones ambientales presentan una variación amplia durante los dos periodos de ensayos, combinándose días de alta irradiancia solar con días nublados. También hay que apreciar que en ambos periodos se producen precipitaciones, siendo más representativas durante el segundo ensayo. Este es un aspecto a tener en cuenta, ya que la lluvia puede producir un error añadido en la medida de la instrumentación. Se puede ver que la componente de radiación sobre la superficie vertical es inferior a la componente incidente sobre la superficie horizontal en el primer ensayo, al tratarse del periodo estival, y mayor durante el segundo ensayo, al tratarse del periodo invernal. Otra variable importante es la velocidad de viento frente a la muestra. Altas velocidades podrían complicar el proceso de medida y ampliar la incertidumbre de caracterización de las temperaturas superficiales, además de participar en el coeficiente de convección superficial exterior. En un principio, se puede considerar que, aunque el periodo de ensayo sea corto, la variabilidad de las

condiciones climáticas es amplia y representativa. A lo largo del estudio de IQ-Test, tras el análisis de los resultados, se verificará si esta premisa se cumple adecuadamente.

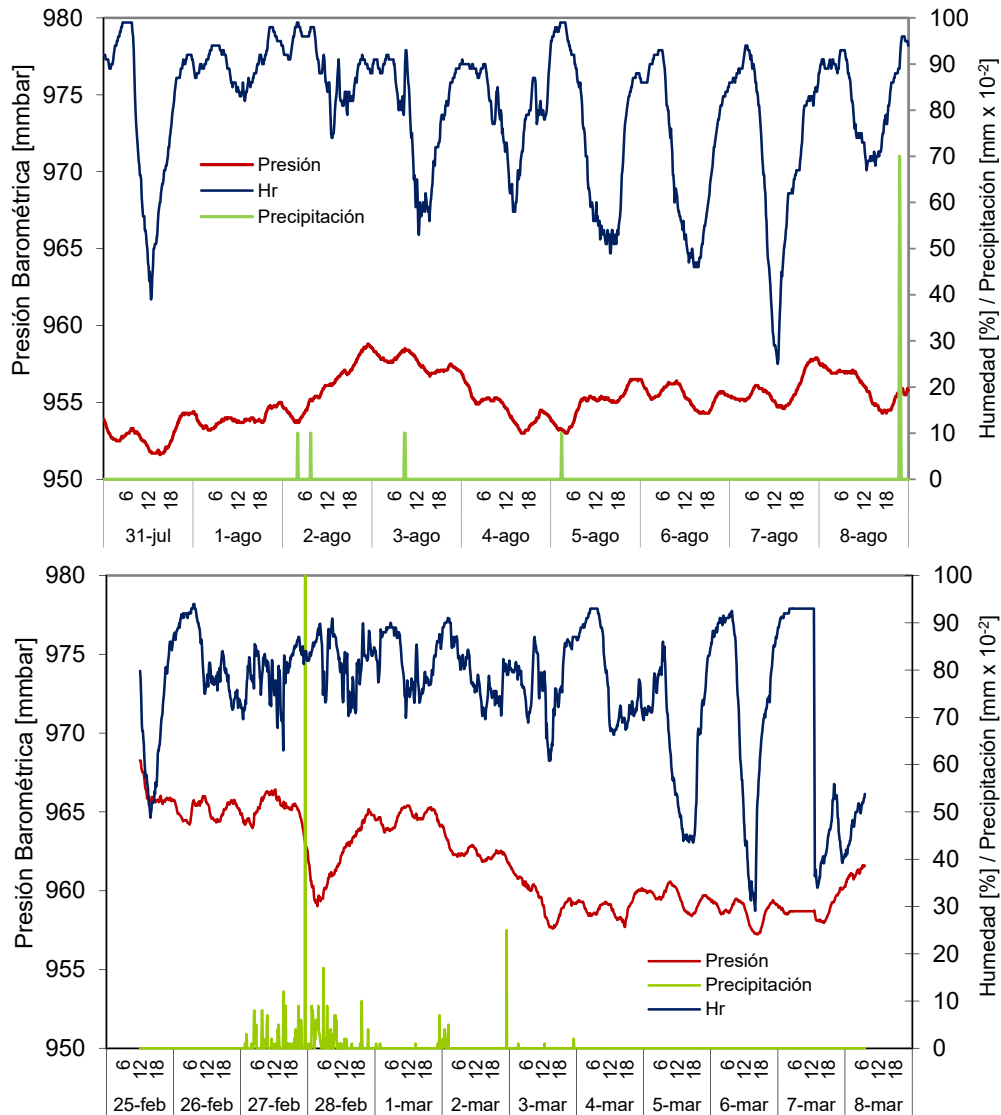


Figura 3.16 – Condiciones ambientales durante el primer ensayo, gráfica superior, y del segundo ensayo, gráfica inferior, del muro opaco

Una vez analizadas las condiciones exteriores, se pasa a evaluar el comportamiento de la sala de ensayo. El primer punto en importancia es la revisión de la potencia introducida y el flujo de calor de la envolvente. En la Figura 3.18 se muestran los valores medidos en cada uno de los ensayos. Durante el segundo ensayo se amplió la potencia de calefacción a 500 [W], para aumentar el flujo de calor a través del muro opaco, ya que lo permitían las condiciones de invierno, de forma que no se sobrepasase el límite superior de temperatura de la sala de ensayos. Esta es la situación ideal de medida, que reduce al mínimo las incertidumbres de ensayo. El comparar los resultados del primer ensayo del muro opaco con los del segundo ensayo permitirá evaluar el aumento en el error del ensayo cuando se trabaja con el mínimo salto de temperatura y flujos pequeños, (como se produce en las condiciones de verano y muestras aislantes), con la situación óptima, máximo salto de temperaturas y flujos elevados, condiciones de invierno.

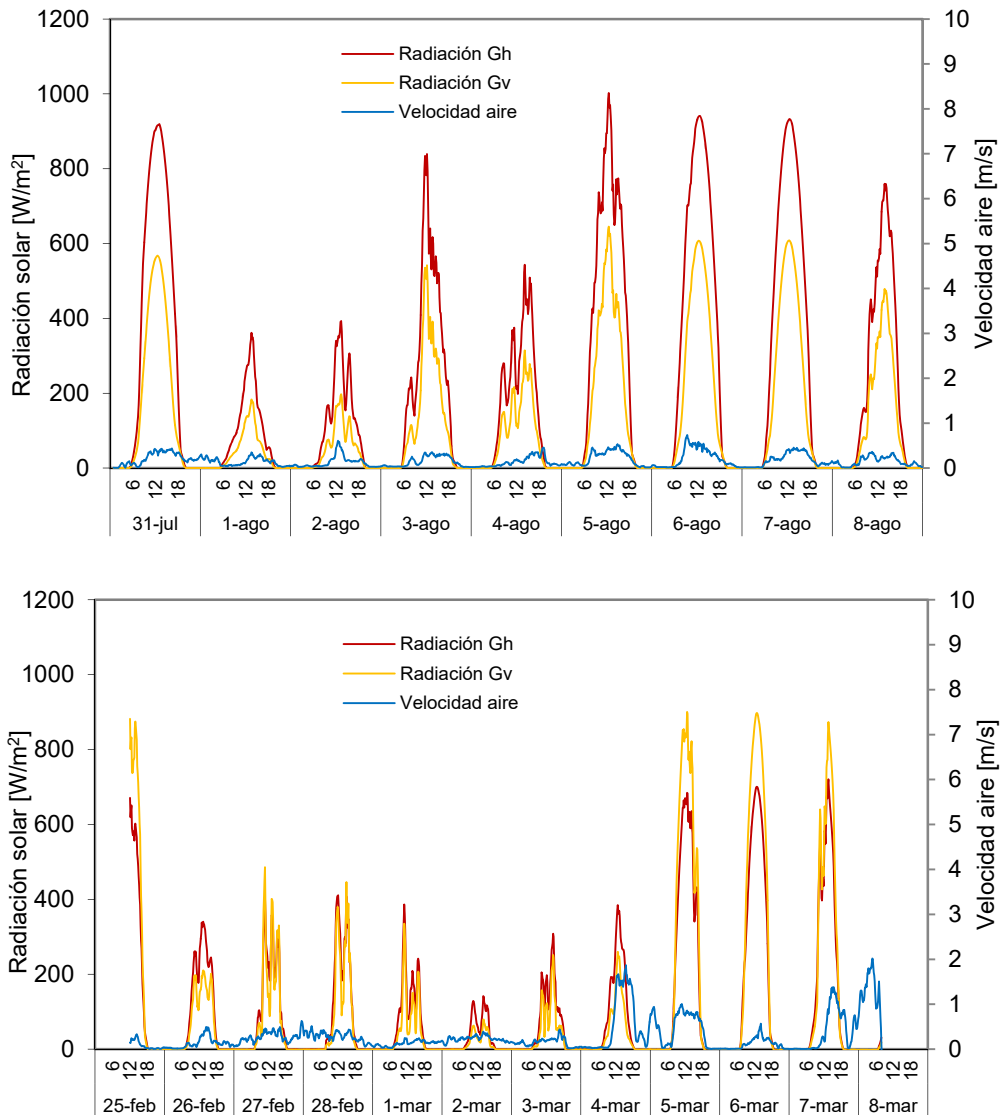


Figura 3.1397 – Radiación solar y velocidad del aire durante el primer ensayo, gráfica superior, y del segundo ensayo, gráfica inferior, del muro opaco

Es decir, estos dos ensayos permiten acotar, en cierta medida, la validez de la metodología del ensayo *PASLINK*. Se puede apreciar cómo en ambos casos el flujo neto que atraviesa la envolvente es positivo durante todo el periodo de ensayo, es decir, siempre hay un flujo saliente de la sala de ensayos. Estas condiciones facilitan el posterior proceso de identificación de parámetros. Y si se analiza el balance promedio de energía en la sala de ensayo, para el primer ensayo, el 70,7% de la energía introducida se pierde por la superficie de la envolvente, aunque ésta representa hasta el 89,9% de la superficie total. En el segundo ensayo, la envolvente se lleva el 76,3%. Con estos valores se puede apreciar que caracterizar adecuadamente el flujo que atraviesa la envolvente es fundamental. Y teniendo en cuenta que el muro opaco es una muestra de elevado aislamiento, el adecuado diseño de la envolvente de la celda permite que el componente intercambie un 30% de la energía, representando únicamente el 10% de la superficie. Para validar el flujo intercambiado por la envolvente medido por las *tiles* es necesario revisar los grupos individuales que los componen.

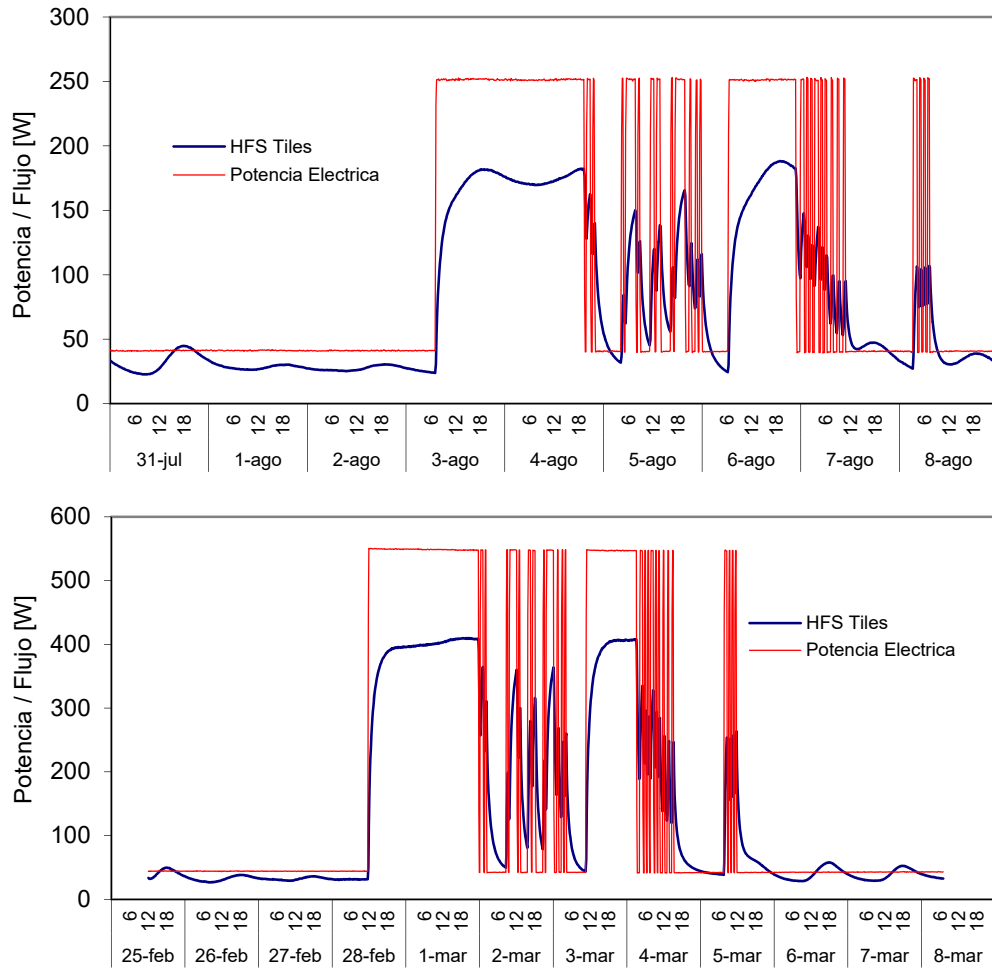


Figura 3.18 – Potencia introducida y flujo de la envolvente durante el primer ensayo, gráfica superior, y del segundo ensayo, gráfica inferior, del muro opaco

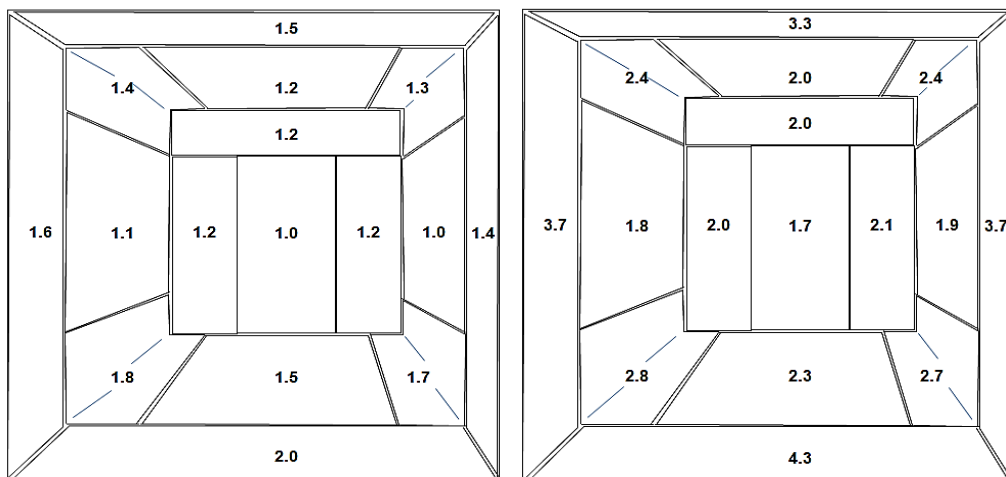


Figura 3.1419 – Valor medio de la densidad de flujo de calor $[W/m^2]$ medido por cada grupo de *tilas* durante el primer ensayo del muro opaco, izquierda, y durante el segundo ensayo, derecha

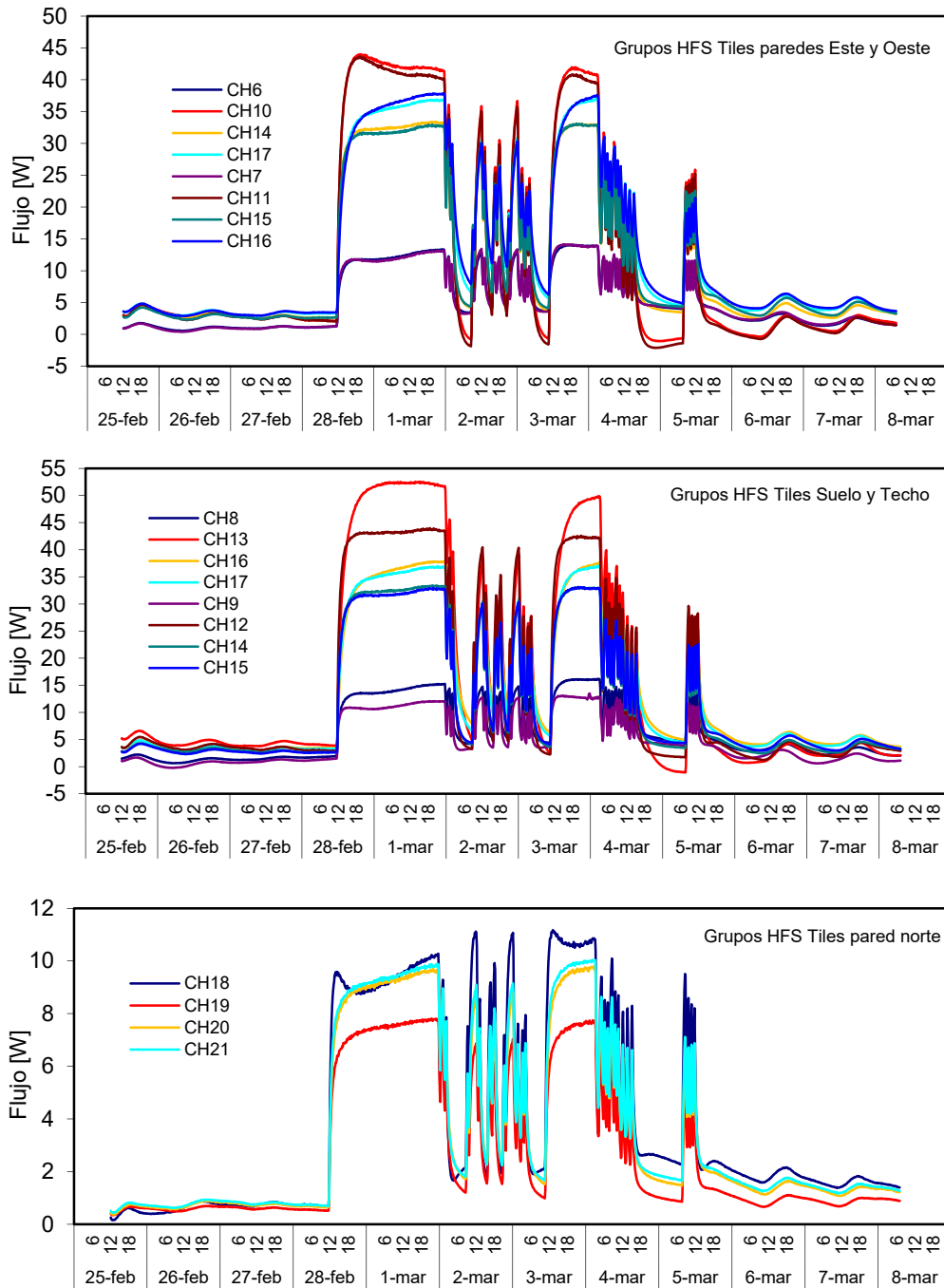


Figura 3.20 – Flujos de calor registrados por cada grupo de HFS Tiles durante el segundo ensayo del muro opaco

En la Figura 3.19 se muestran los flujos, por unidad de superficie [W/m^2], promedios medidos por cada grupo en el periodo completo de cada uno de los ensayos del muro opaco. Se puede apreciar que los valores más pequeños se dan en los grupos centrales que miden los flujos unidimensionales. Y que los grupos de borde que los rodean presentan flujos mayores, con valores intermedios entre los flujos centrales adyacentes. También se puede apreciar que los flujos de la cara norte son los más pequeños, y en esta zona, los efectos de borde son despreciables. Esto verifica la hipótesis de trabajo, definida en el proceso de calibración, planteada en el *Capítulo 1*. También se puede observar que en la zona de borde de la muestra es donde se produce la mayor densidad de flujo de calor. En la Figura 3.19, en la imagen derecha,

correspondiente al segundo ensayo, los flujos presentan mayor estabilidad, al realizarse el ensayo con una potencia de calefacción superior, frente a los resultados del primer ensayo, imagen de la izquierda, donde los valores son similares, al trabajar con flujos de menor magnitud, y más complejos de medir. Una vez verificado que los flujos promedios son coherentes, queda por analizar que la evolución de los mismos sea correcta. En la Figura 3.20 se muestra, como ejemplo, los flujos registrados por cada grupo de *HFS Tiles* para el segundo ensayo del muro opaco. Para verificar la correcta medición del flujo de calor intercambiado por la envolvente es necesario revisar la lectura de cada grupo, de forma que se cumplan las siguientes condiciones:

- La señal de los grupos 10 y 11 sea similar y corresponda a la de mayor magnitud. Ya que estos grupos corresponden a las zonas centrales de las paredes este y oeste y son los grupos de mayor superficie.
- La señal de los grupos 16 y 17 sea similar. Estos grupos corresponden a las zonas de borde del suelo.
- La señal de los grupos 14 y 15 sea similar y algo inferior a la de la pareja anterior. Estos grupos corresponden a la zona de borde del techo, que presenta mayor aislamiento que el techo.
- La señal del grupo 13 sea la de mayor magnitud. Este grupo corresponde con la zona central del suelo.
- La señal del grupo 12 sea la segunda en magnitud. Este grupo corresponde con la zona central del techo.
- La señal de los grupos 6 y 7 sea similar. Estos grupos corresponden a las zonas de borde laterales de encuentro con el portamuestras. Es de destacar como se dan periodos en los que el flujo se invierte. Esta situación verifica lo complejo que sería poder cuantificar el flujo real intercambiado por la envolvente de la sala de ensayos si no se dispusiese del sistema de *tiles*.
- La señal de los grupos 8 y 9 sea similar, pero con mayor divergencia que la pareja anterior. Estos grupos corresponden a las zonas de borde inferior y superior, respectivamente, de encuentro con el portamuestras. De forma que, la señal del grupo 8 debe ser superior a la del grupo 9, debido a la diferente configuración de aislamiento del portamuestras.
- La señal de los grupos 20 y 21 sea similar. Estos grupos corresponden a las zonas de borde lateral de la pared norte.
- La señal del grupo 18 esté próxima a la de los grupos anteriores, ya que el efecto de borde en la cara norte es mínimo. Este grupo presenta un comportamiento algo particular, debido a que es el grupo situado sobre la puerta de acceso a la sala de ensayos.
- La señal del grupo 19 debe ser similar pero inferior a la de los grupos 20 y 21. Este grupo corresponde a la zona de borde superior de la pared norte, y presenta menor superficie.

Aprovechando los grupos desconectados del muro de calibración, grupos del 1 al 5, se ha realizado un *by-pass* en los mismos, de forma que sirvan para caracterizar el efecto del ruido de medida del sistema de adquisición en la medida del flujo de calor de las *tiles*. En la Figura 3.21 se muestra la lectura de estos grupos de control. Se aprecia cómo siguen un patrón de ruido, rodeando al cero de forma aleatoria, aunque se aprecia una cierta desviación en la lectura de ruido del grupo 5, lo que se puede explicar por la cercanía de dicho conector al calefactor. El ruido presenta una aportación inferior a 0,05 [W], que para el flujo medio intercambiado por la envolvente, correspondería a una componente de error de medida inferior al 0,25% de la señal. Este parámetro se tiene en cuenta en el cálculo de la incertidumbre de medida del flujo de la envolvente, y su correspondiente efecto en la incertidumbre final de los resultados de ensayo.

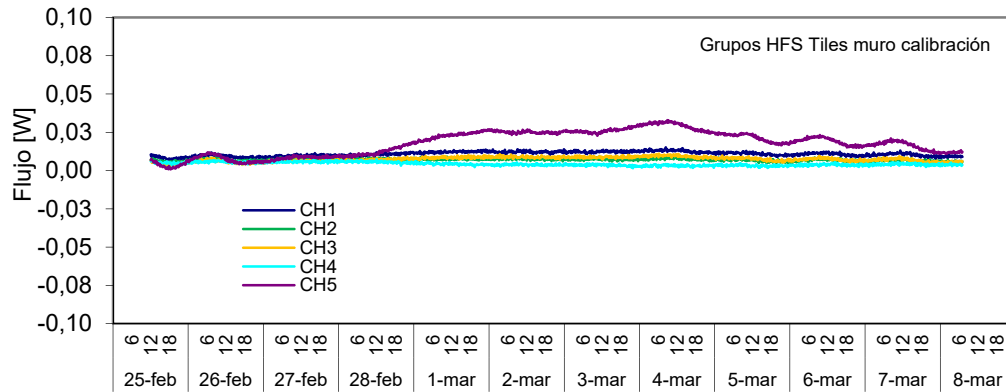


Figura 3.21 –Ruido de medida del flujo registrado por las tiles

Una vez verificado que los flujos de calor medidos son correctos, sólo falta evaluar las temperaturas de la sala de ensayo, de cara a poder mantener las hipótesis de los modelos planteados para la celda. En la Figura 3.22 se muestra la evolución de las principales temperaturas, por un lado, las temperatura promedio de aire y superficie interior de la sala de ensayo, y por otro lado, la temperatura exterior ventilada frente a la muestra.

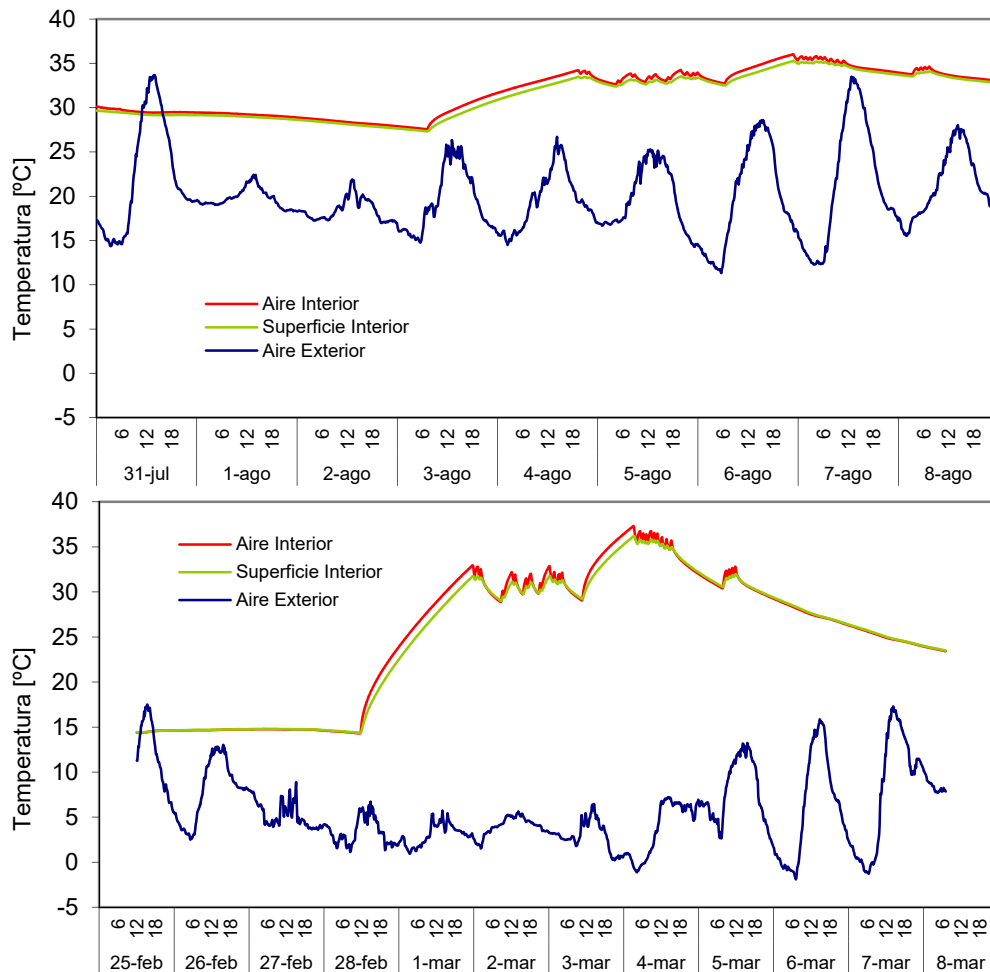


Figura 3.22 –Evolución de las temperaturas en la sala de ensayo y del ambiente exterior para el muro opaco

Se puede apreciar el efecto de trabajar con una potencia de calefacción mayor durante el segundo ensayo, gráfica inferior. De cara a la fase de modelado, es necesario verificar previamente que se cumplen las hipótesis de trabajo, como la homogeneidad de la temperatura interior. En la Figura 3.23 se muestra el salto de temperaturas entre ambientes para cada instante, y el salto integrado a partir del momento en el que entra la rutina de calentamiento, curvas de color rojo. Se puede apreciar cómo durante el ensayo realizado con una potencia de 250 [W], el salto promedio es del orden de 10°C, mientras que con potencias de 500 [W], el salto de temperaturas pasa a tener valores promedios del orden de 25°C. Esta diferencia mayor permite obtener medidas de flujos más homogéneas y fiables en los diferentes grupos de la envolvente, y un mayor intercambio de energía a través de la muestra, lo que mejora en gran medida el proceso de caracterización.

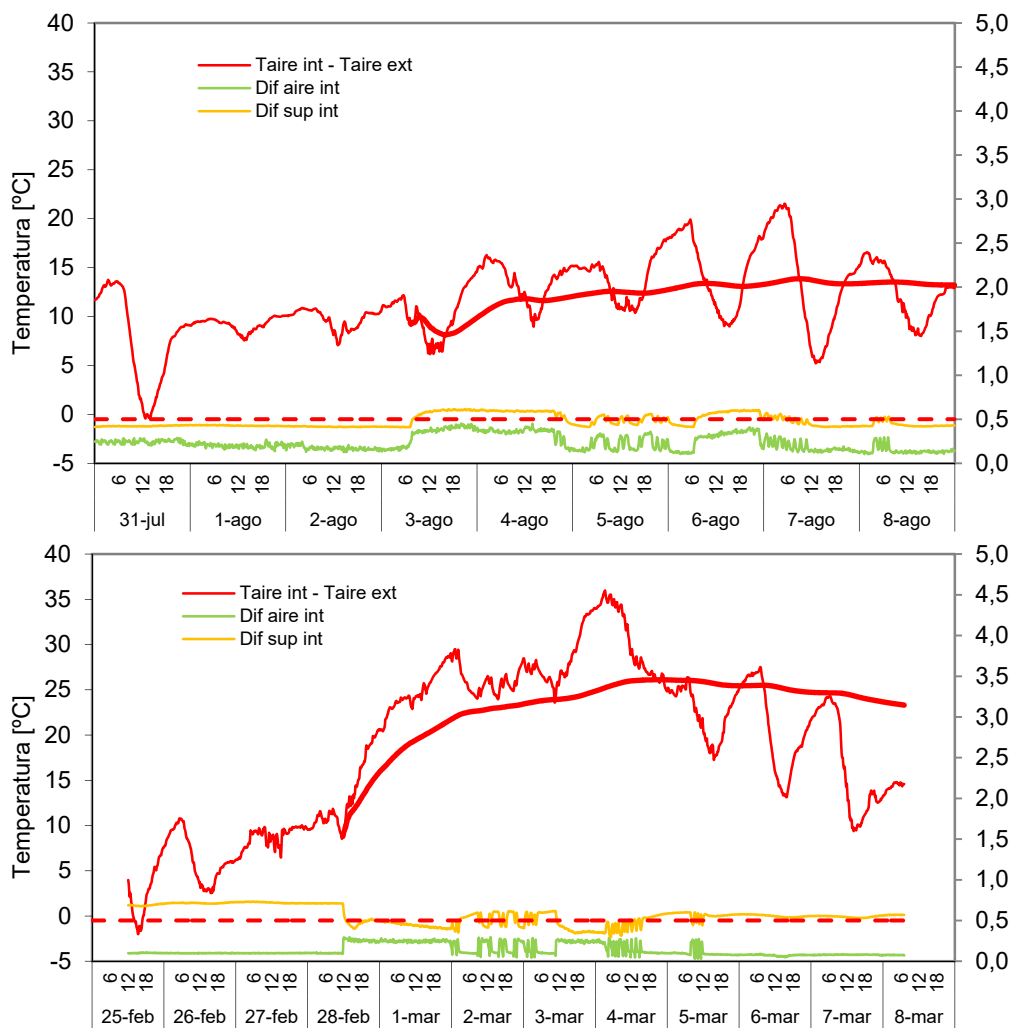


Figura 3.23 –Salto de temperatura entre ambientes y homogeneidad temperaturas de aire y superficie interior

Sin embargo, en ambos casos, la diferencia máxima entre el grupo de sondas de temperatura de aire interior de la sala de ensayos no supera el valor máximo de 0,5°C, luego se puede mantener la hipótesis de temperatura única del volumen de la sala de ensayo. Las diferencias entre las temperaturas de superficie son mayores, pero no superando en ningún momento los 0,8°C. Luego, también se puede suponer una temperatura única para la superficie de la envolvente sin cometer un error

representativo. Una vez evaluadas las condiciones de ensayo de la celda, ya se puede pasar a estudiar el comportamiento de la probeta bajo estudio. En este caso, al disponer de los diferentes perfiles de temperaturas que se generan en la probeta, tanto en la zona central, como en las zonas de borde, así como los flujos puntuales en las superficies externas, el estudio puede ser más detallado, y permitir obtener información de gran interés para conocer mejor el efecto del portamuestras en la caracterización de futuras probetas.

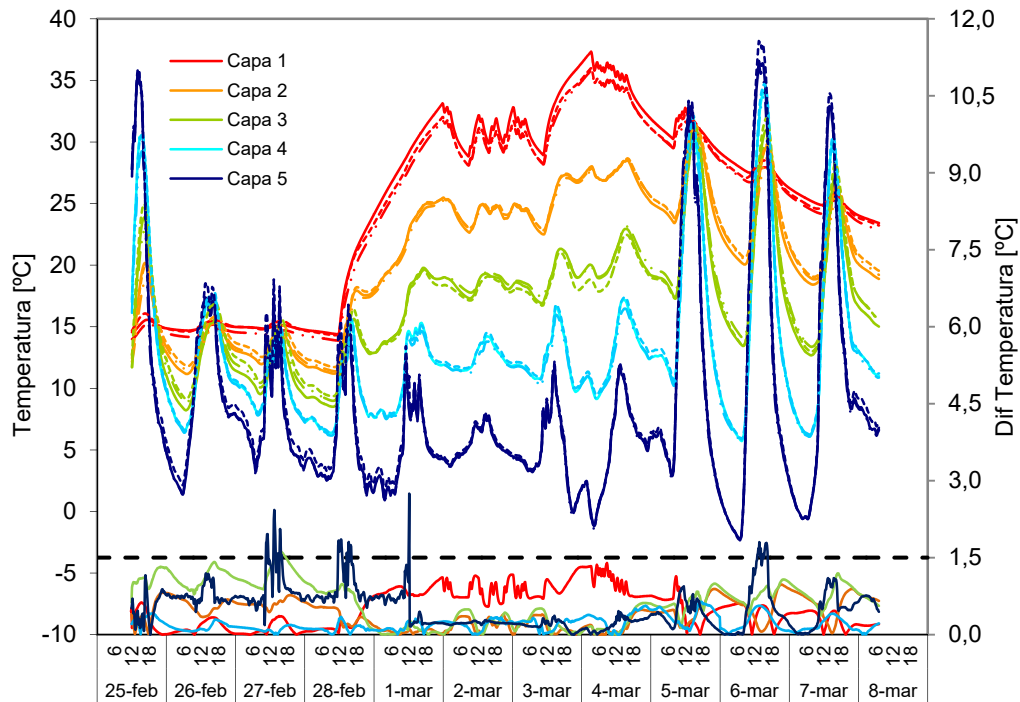


Figura 3.24 –Evolución de los perfiles de temperatura a lo largo del espesor del muro opaco, para la zona central, lateral y esquina inferior

En la Figura 3.24 se muestran los tres perfiles de temperatura transversales que se registran en el muro opaco, el perfil A, que corresponde al punto central, y que se muestra como una línea continua, el perfil B, que corresponde al lateral oeste del perímetro, y que se muestra como una línea discontinua a rayas, y el perfil C, que corresponde con la esquina inferior oeste, y se muestra como una línea de puntos y rayas. Se puede apreciar que las temperaturas de los tres perfiles, para cada espesor de la probeta, evolucionan de la misma forma. Las temperaturas de la primera capa interior siguen a la temperatura de aire interior de la celda, definida mediante la rutina *ROLBS*, mientras que las temperaturas de la *capa 5*, la capa más exterior, sigue a la temperatura *sol-aire*. Las temperaturas del resto de capas se distribuyen de forma progresiva entre ambos extremos. Este efecto se aprecia más claramente durante el periodo central del ensayo, días del 1 al 5 de marzo, donde el flujo es prácticamente unidireccional, del interior de la sala de ensayos hacia el exterior, ya que no hay mucha incidencia solar y la calefacción de la sala de ensayos genera un gradiente elevado de temperaturas dentro de la probeta. Durante el periodo final del ensayo, cuando la celda evoluciona libremente, se puede apreciar que las temperaturas de las diferentes capas se aproximan en los momentos de incidencia solar y se alejan durante las horas nocturnas. En promedio, la temperatura de los perfiles del lateral y esquina para cada capa no superan una diferencia media de 0,5°C respecto de la zona central de la muestra. Salvo en casos puntuales en los que se alcanzan diferencias máximas del

orden de 1,5°C. Las diferencias respecto al perfil central en cada instante se muestran en la parte inferior de la Figura 3.25, para cada una de las capas. Se puede observar cómo estas diferencias toman valores próximos al cero durante el periodo de tiempo en el que está activa la calefacción siguiendo la rutina *ROLBS*, salvo para la capa interior, en la que se alcanzan temperaturas superiores en la zona central de la muestra debido al movimiento de aire producido por el ventilador de agitación. Durante los periodos libres se produce una mayor oscilación de las diferencias respecto a la temperatura de la zona central, debido a la incidencia solar y su evolución a lo largo del día. Este efecto se aprecia más en la temperatura de la *capa 6*, que se ve afectada por picos puntuales de calentamiento, pero de poca influencia, en las zonas interiores de la muestra.

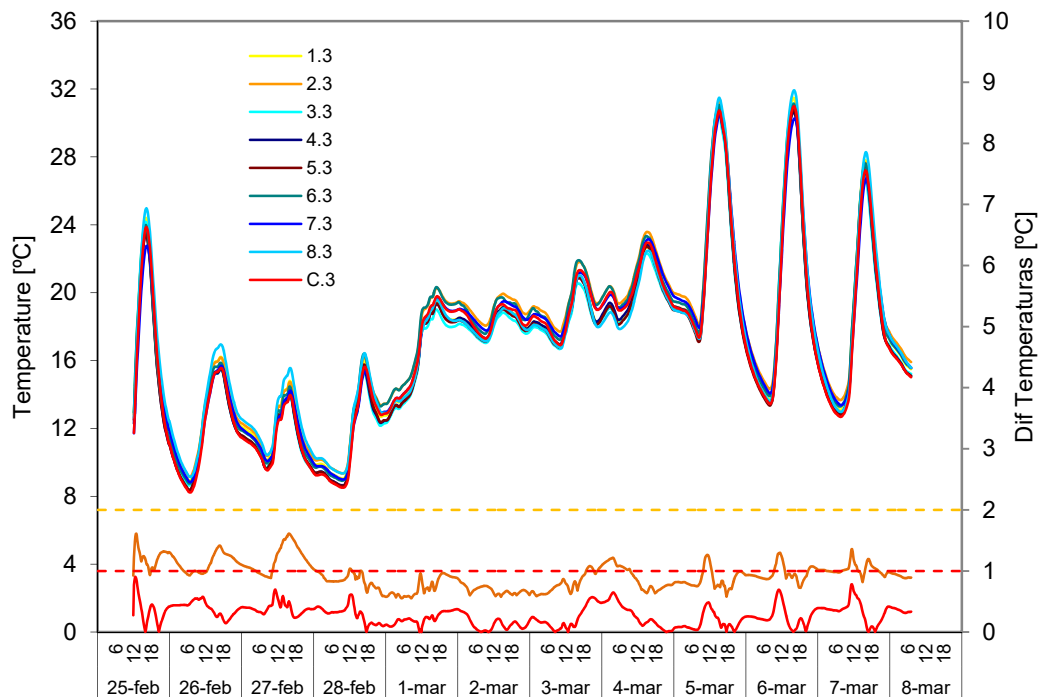


Figura 3.25 –Evolución de las temperaturas en el plano central del muro opaco

Como se ha indicado anteriormente, la probeta opaca del *IQ-Test* está diseñada para evaluar, además del efecto de borde en los perfiles de temperatura próximos a la zona del portamuestras, el comportamiento de las temperaturas en todo el plano central. En la Figura 3.4 se muestra la disposición en cuadrícula de las nueve sondas situadas en dicho plano central. En la Figura 3.25 se puede ver los valores registrados por el conjunto de sensores de temperatura. Se puede apreciar que la temperatura es muy homogénea en toda la superficie a lo largo de todo el ensayo. En la zona inferior de la gráfica se muestra en rojo la diferencia de temperatura del perímetro del muro opaco respecto a la temperatura central. Esta diferencia es inferior a 1 [°C] en todo momento y toma un valor medio a lo largo del ensayo del orden de 0,3 [°C]. En color naranja se muestra la diferencia máxima entre todos los puntos medidos de la superficie. Se puede observar que los gradientes máximos dentro del plano de temperaturas son inferiores a 2 [°C] y tienen un valor medio durante el ensayo de del orden de 0,9 [°C].

A continuación se analiza el mapa de temperaturas en el plano central de la muestra, para tres instantes de interés a lo largo del ensayo. Un instante representativo del periodo de calefacción, y dos instantes correspondientes al periodo libre, en situación

de máximas y mínimas temperaturas. En la Figura 3.26 se puede ver el comportamiento de la probeta durante el periodo de calentamiento, que corresponde con los datos del día 1 de marzo a las 18:00h, momento en el que la rutina está aplicando la excitación escalón en el interior de la sala de ensayos. El plano de temperaturas XY está representado tal como si se viera la muestra en la dirección sur-norte, es decir, el lateral izquierdo, con $x = 0$ [m], corresponde con el eje oeste del muro opaco y el lateral derecho, con $x = 2,7$ [m], se corresponde con el eje este. El eje Y muestra la posición en altura, con $y = 0$ [m] para la zona inferior e $y = 2,7$ [m] la zona superior. En el eje Z se muestra la diferencia de temperaturas en cada punto respecto a la temperatura central. La superficie de temperaturas se obtiene mediante interpolación cúbica de los puntos de medida. Durante el periodo de activación de la rutina de calentamiento, el flujo de calor mantiene el sentido del interior de la sala de ensayos hacia el ambiente exterior, como se puede apreciar en los perfiles de temperaturas por capas. Este es el periodo de mayor importancia para el posterior estudio de identificación de parámetros, por lo que es fundamental que los planos de temperatura en la muestra no se vean afectados por el sistema de portaprobetas, y su evolución sea dependiente sólo de las propiedades de la misma.

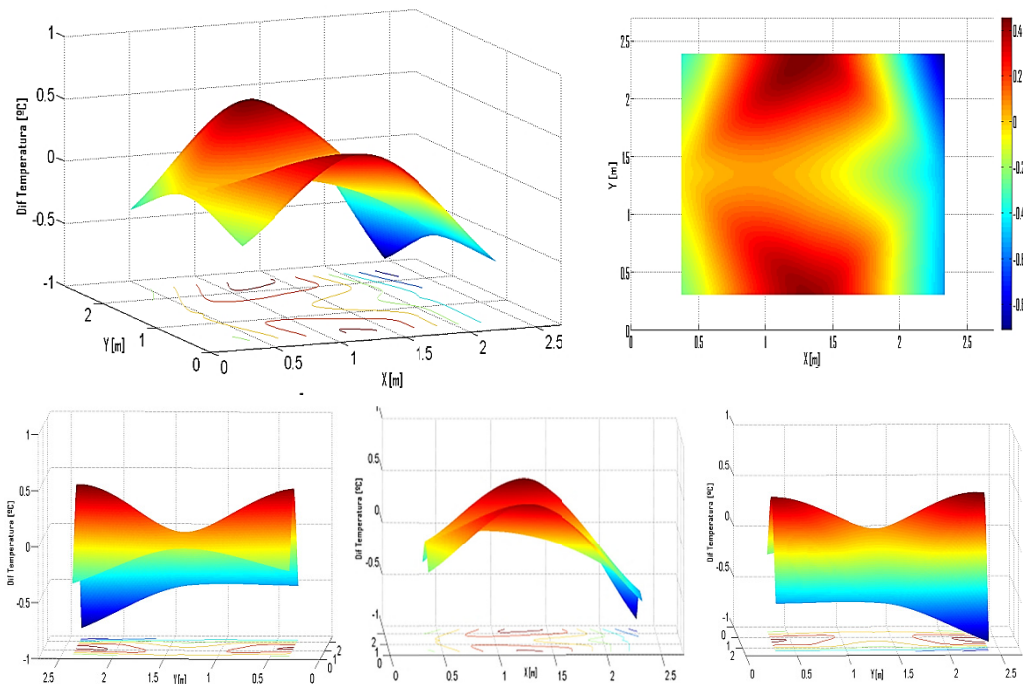


Figura 3.26 – Temperaturas plano central muro opaco para instante representativo del periodo de calefacción

En este caso, la muestra de muro opaco del IQ-Test, al tratarse de un material homogéneo, debería presentar superficies de temperatura lo más planas y paralelas posibles entre sí. Para el instante tomado como ejemplo, la diferencia media del plano respecto al punto central, donde se considera flujo unidimensional, es de $0,44^{\circ}\text{C}$, siendo la máxima de $0,92^{\circ}\text{C}$, por lo que se puede considerar un buen comportamiento en temperatura. Aun así, sí se puede apreciar el efecto de los bordes de la probeta, como se puede observar en la Figura 3.26, en la que se ha aumentado el eje Z para poder apreciar mejor el relieve de la superficie de temperaturas. Las zonas laterales de la muestra presentan menos temperatura que el punto central, dándose las menores temperaturas en el eje este, $x = 2.34$ [m], y el punto de mayor diferencia respecto al centro corresponde a la esquina superior este. Sin embargo, los puntos centrales,

superior e inferior, presentan mayor temperatura que la zona central. Este comportamiento se puede explicar cómo combinación del efecto de la radiación solar y del ventilador de agitación de la sala de ensayos. En el primer caso, el eje oeste ha estado recibiendo radiación durante todas las horas de la mañana, mientras que el eje este, debido al retranqueo de la muestra dentro del marco portaprobetas, ha estado más tiempo en sombra, sufriendo menor calentamiento. En cuanto a la agitación del aire, aunque se emplea un ventilador tangencial de 1 [m] de longitud, para aumentar la distribución del calor, la dimensión finita del mismo, y su disposición enfrentada a la cara interior de la muestra, genera una banda central de mayor calentamiento, que se ve acentuada por un pequeño efecto de estancamiento del aire en las esquinas, tanto inferior como superior.

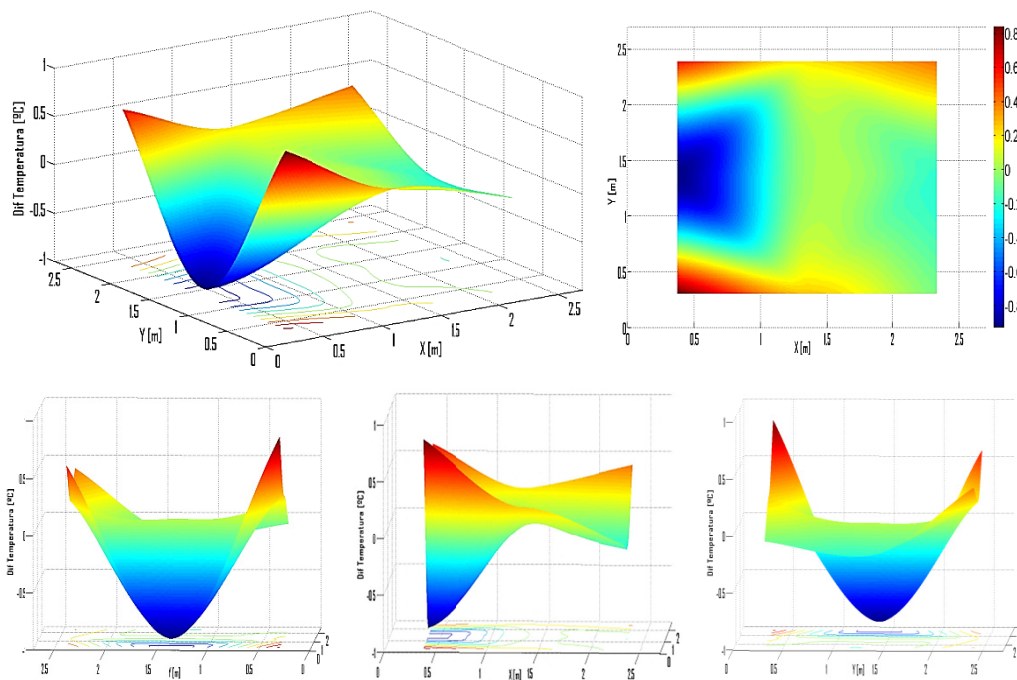


Figura 3.27 – Temperaturas en el plano central del muro opaco para un instante de máximas temperaturas durante el periodo de evolución libre de la sala de ensayos

Otro análisis interesante es evaluar cómo se comporta el sistema muestra-portaprobetas cuando la temperatura de la sala de ensayos evoluciona libremente, sin activación de ninguna rutina de calentamiento. En la Figura 3.27 se muestra el plano central de temperaturas para el instante correspondiente a las 15h de la tarde del día 6 de marzo. Las diferencias medias y máximas se mantienen en valores similares a los obtenidos durante el periodo de calefacción. En este caso la diferencia media respecto al punto central es de 0,43°C, y el valor máximo, que se da en la zona central del eje oeste, es de 0,91°C. Se puede apreciar en el mapa de isotermas, figura superior izquierda, que el plano de temperaturas es muy homogéneo en toda la zona central de la muestra, generándose un aumento de temperaturas en las esquinas de la misma, pero con poca superficie de influencia frente a la superficie total. Esto se debe a que el efecto del ventilador durante el periodo de calefacción desaparece por completo. Por el contrario, es de destacar el enfriamiento de la zona central del eje oeste, que se explica debido al sombreado del mismo, por tratarse de un día con una radiación solar elevada, y ser una hora del día avanzada. Por lo que el efecto de la incidencia solar se mantiene, y su evolución a lo largo de las horas del día es el componente que genera las mayores distorsiones de campo de temperaturas de la muestra.

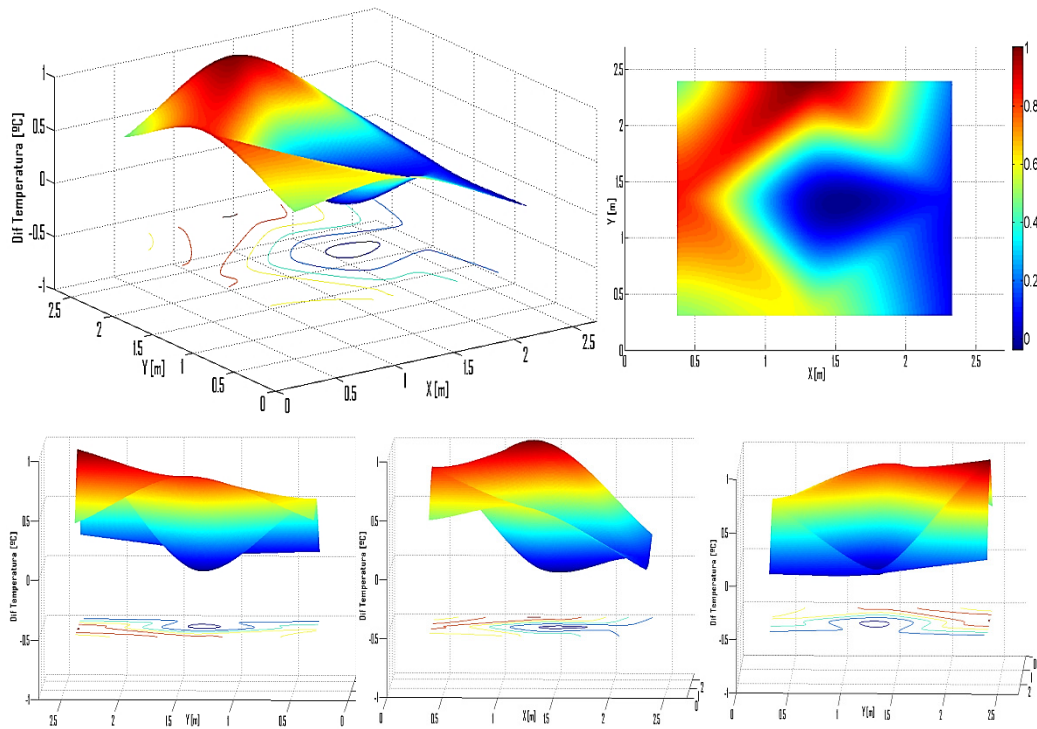


Figura 3.28 – Temperaturas en el plano central del muro opaco para un instante de mínimas temperaturas durante el periodo de evolución libre de la sala de ensayos

Para poder evaluar el comportamiento sin el efecto de la radiación solar, se toma un instante de tiempo de la madrugada. En la Figura 3.28 se muestra el mapa de temperaturas correspondiente a las 4h de la mañana del día 7 de marzo. En este caso se aprecia claramente un pozo de temperaturas correspondientes al punto central de la muestra, como era de esperar, ya que en los bordes se produce mayores pérdidas de calor. La zona de mayor temperatura corresponde con el borde superior, debido al impulso del aire realizado por el ventilador. En un principio, por la simetría vertical de la configuración del portamuestras se debería esperar que los bordes laterales presentasen el mismo patrón de temperaturas, y sin embargo sorprende los valores tan bajos que se dan en el eje este, casi del mismo orden que en la zona central. Esta diferencia se explica debido a las bajas temperaturas que se alcanzan durante la noche del día 7 de marzo, tomando valores negativos. Debido a la inclinación que presenta la celda, con pendiente oeste-este, para la evacuación del agua de precipitación, la condensación y posterior congelación del agua superficial de la muestra produce una mayor transmisión de calor en dicho eje oeste, explicando el patrón de temperaturas que se puede observar en la imagen principal y los diferentes perfiles del plano central de temperaturas mostrados en la Figura 3.28.

Como evaluación global del efecto del portamuestras en el comportamiento de las temperaturas de la probeta, cabe concluir que el diseño del sistema desarrollado en la celda *PASLINK* es muy adecuado. El efecto de borde es reducido y acotado, no generando desviaciones de la temperatura media por encima de medio grado, y máximas no superiores al grado. El efecto de los bordes del portamuestras se podrían reducir aumentando la superficie la propia muestra, pero esto entraría en conflicto con otros aspectos al requerir un mayor volumen de la sala de ensayos, lo que complicaría el mantener controladas las infiltraciones, o aumentando el porcentaje de flujo de

calor que atraviesa la envolvente de la sala de ensayos frente al que atraviesa la muestra, complicando el posterior análisis de los modelos de identificación.

Aunque en temperaturas, los resultados sean buenos, es necesario analizar también los flujos de calor que se producen en las distintas zonas de la muestra. Para ello se dispone de los tres fluxímetros situados en la cara interior del muro opaco, del fluxímetro situado en la zona central, correspondiente al flujo unidimensional, y de los fluxímetros situados en el borde oeste, zona central y esquina inferior. En la Figura 3.4 y en la Figura 3.5 se puede apreciar la disposición exacta de todos los fluxímetros instalados. Se dispone de un fluxímetro más, situado en la capa exterior, en la zona central, que puede servir como verificación y referencia de los modelos posteriores de análisis. Su aplicación no tiene mayor alcance, ya que su medida es la que presenta mayor error, debido al efecto de calentamiento solar de la superficie exterior.

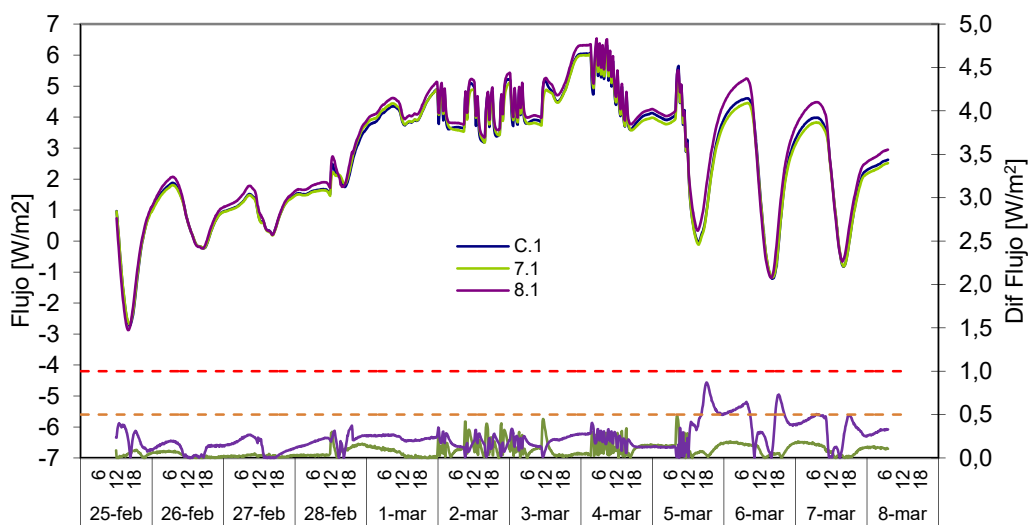


Figura 3.29 –Señal de los fluxímetros integrados en la cara interior del muro opaco

En la Figura 3.29 se muestra la señal registrada por los flujos en la cara interior. Se puede apreciar que el flujo central y el flujo en la zona central del borde son próximos, no presentando diferencias superiores a los $0,5 \text{ [W/m}^2\text{]}$. En promedio, la diferencia relativa entre ambos flujos es del 3,1%. En la zona de esquina, se puede ver que se alcanzan flujos superiores, aunque, durante el periodo de funcionamiento de la rutina de calentamiento las diferencias respecto al flujo central tampoco superan los $0,5 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Sin embargo, durante el periodo libre, y cuando se producen días de incidencia solar importante, las diferencias alcanzan valores de hasta $1 \text{ [W/m}^2\text{]}$. En promedio, durante el periodo de ensayo, la diferencia relativa respecto a la zona central, en la zona de esquina, es de 8,2%. Se puede apreciar cómo, aunque la muestra presenta un buen comportamiento en la evolución de sus planos de temperatura, estas pequeñas diferencias generan variaciones de flujo importantes en las zonas de borde. Este efecto se ve más acentuado en las zonas de esquina, generando un flujo superficial de intercambio en la probeta representativo, que tendrá una repercusión más importante cuanto más aislante sea la muestra bajo estudio. Este aspecto ya se ha podido ver durante el análisis del proceso de calibración desarrollado en el capítulo anterior. El valor de transmitancia del muro de calibración obtenido con el conjunto total de *tiles* daba valores muy superiores a la transmitancia obtenida con el grupo central únicamente. El muro de calibración es un elemento de elevado aislamiento, y por tanto los efectos de borde presentan el máximo efecto sobre el estudio de la muestra. El muro opaco del *IQ-Test* también presenta un aislamiento importante, y más

próximo a valores de ensayo en la edificación, y por tanto, sirve perfectamente como referencia y análisis del umbral máximo de incertidumbre del efecto de borde en el estudio de las propiedades térmicas de las muestra de ensayo.

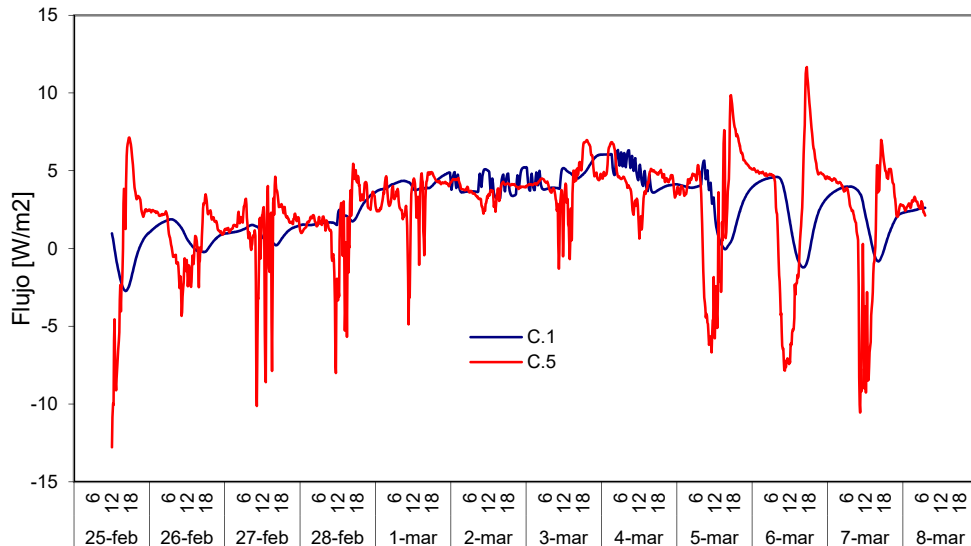


Figura 3.30 –Flujos de calor de la zona central del muro opaco en la cara interior y exterior

Por último, en la Figura 3.30 se muestra la comparativa de flujos medidos en el eje central del muro opaco para las superficies interior y exterior. Como ya se indicaba, se puede apreciar que el efecto de la radiación solar genera un mayor ruido en la señal medida pero, aun así, es un valor interesante de análisis. En efecto, se aprecia cómo, durante los periodos libres de la sala de ensayo, el flujo de calor que atraviesa la superficie exterior se atenúa y desfasa debido al efecto de aislamiento de la muestra. Es necesario indicar que se mantiene el criterio de signos de las *tiles* para el flujo de la muestra, es decir, positivo cuando el flujo sale de la sala de ensayos, y negativo cuando presenta sentido de entrada a la misma. También se puede apreciar que durante el periodo de activación de la rutina *ROLBS*, los dos flujos se desacoplan presentando un comportamiento completamente diferenciado, generando una predominancia del flujo saliente a través de la muestra, lo que mejora en gran medida el posterior estudio de identificación de parámetros. Una vez analizados los datos de los ensayos correspondientes a la primera muestra del *IQ-Test*, en el siguiente apartado se evalúan los datos experimentales obtenidos tras retirar la zona central del muro opaco y colocar la ventana correspondiente a la segunda muestra.

3.3.2 Ventana

Como en el estudio de los datos de ensayo anterior, se comienza con el análisis de las condiciones bajo las que se han realizado las medidas. Además, en este caso, las condiciones ambientales presentan una mayor importancia, ya que participan de una forma notoria en el resultado. Junto con esto, al existir una cámara de aire en la muestra, los valores de temperatura media y salto de temperatura entre las superficies de los vidrios implican diferentes comportamientos convectivos. Los dos aspectos comentados sobre el efecto de las condiciones de ensayo sobre la ventana hacen que los resultados, de los distintos centros del interlaboratorios, no sean directamente

comparables, como en el caso del ensayo anterior del muro opaco. En el *apartado 3.5* se realiza un estudio más completo de los mecanismos de transmisión de calor en la ventana, que servirán como base para definir el estudio de incertidumbres del ensayo de ventanas en las celdas PASLINK.

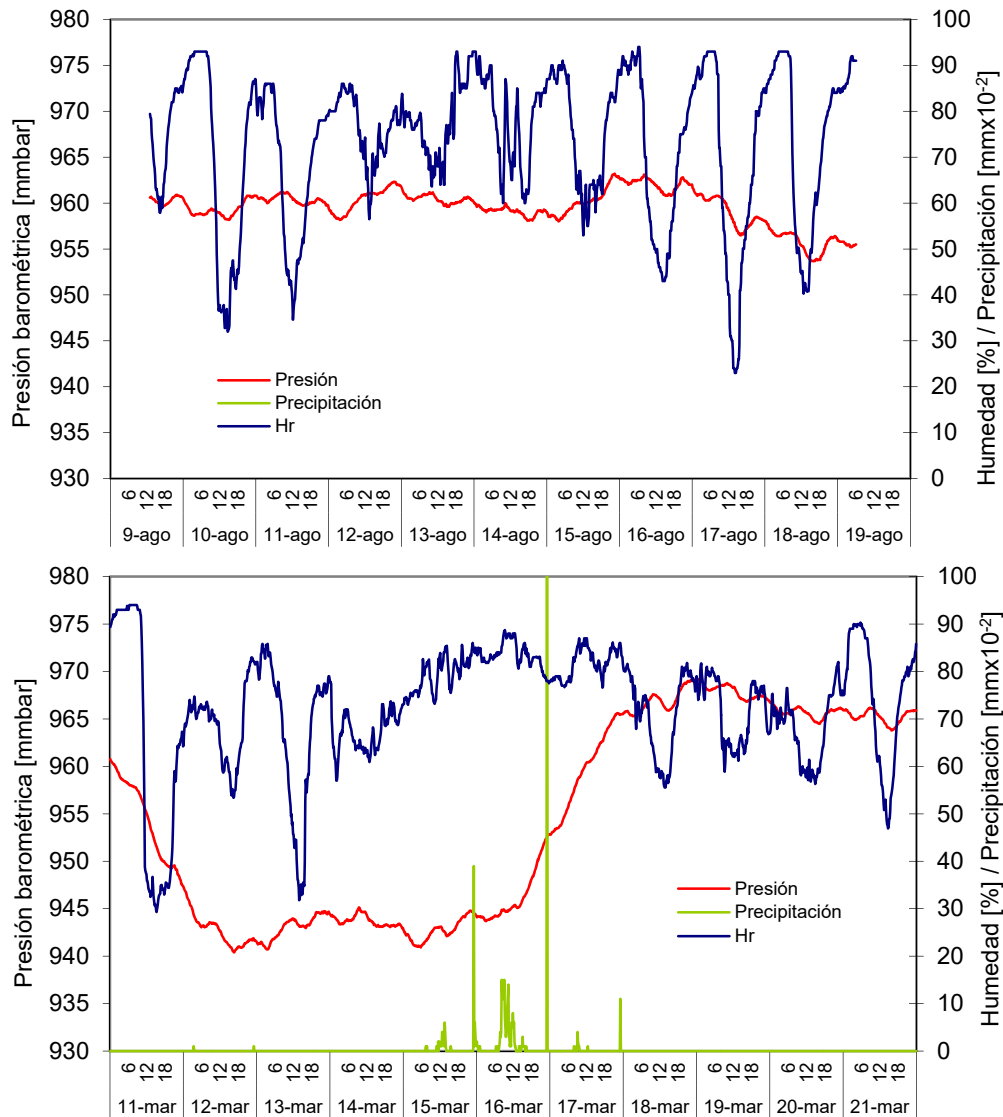


Figura 3.31 – Condiciones ambientales durante el primer ensayo, gráfica superior, y del segundo ensayo, gráfica inferior, de la ventana

En la Figura 3.31 se puede observar que, durante el primer ensayo de la ventana, las condiciones exteriores presentan un comportamiento homogéneo, con presiones ambientales altas y constantes y variaciones cíclicas de la humedad ambiental, siguiendo el ciclo de radiación solar. Durante todo el periodo no se producen precipitaciones. En cambio, durante el segundo ensayo, las condiciones son mucho más variables, con una primera mitad con presiones bajas, junto con precipitaciones, y una segunda mitad del ensayo con presiones altas. En la Figura 3.32 se puede observar la radiación solar y la velocidad de viento frente a la muestra. Durante el primer ensayo, con condiciones estivales, se dispone de una incidencia solar relativamente homogénea a lo largo de los diez días de ensayo, junto con velocidades de viento bajas.

En el segundo ensayo las condiciones de radiación presentan tres días centrales con escasa incidencia solar, y unas condiciones de viento variables, intercalándose días de velocidades altas con días de bajas. Esta variabilidad proporciona unas condiciones óptimas para poder evaluar los efectos de la convección superficial exterior y, a su vez, poder obtener una identificación desacoplada de las propiedades de transmitancia de la ventana y del factor solar. En el apartado 3.4.2 se puede ver el efecto de las condiciones de cada periodo de ensayo en el proceso de identificación de parámetros y en la calidad de los resultados obtenidos.

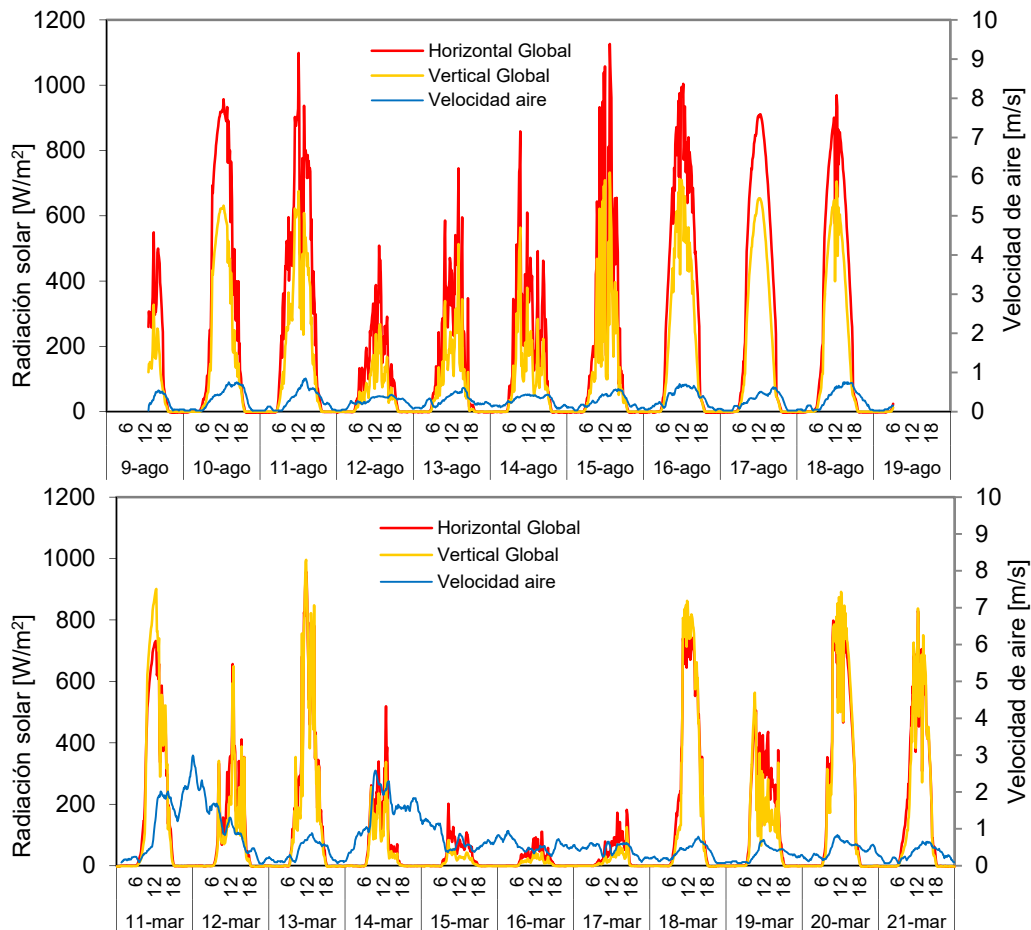


Figura 3.32 – Radiación solar y velocidad del aire durante el primer ensayo, gráfica superior, y del segundo ensayo, gráfica inferior, de la ventana

Como en el análisis del primer componente, una vez evaluadas las condiciones exteriores se pasa a revisar las variables de la sala de ensayos. En la Figura 3.33 se puede ver cómo el comportamiento del flujo que atraviesa la envolvente es muy diferente al que se producía durante el ensayo del muro opaco, que se muestra en la Figura 3.18. En el muro opaco, en ausencia de ganancia solar en el interior de la sala de ensayos, el flujo instantáneo registrado por las *tiles* es menor que la potencia de calefacción, y sigue la rutina de excitación de forma clara, sin darse valores negativos, es decir, el flujo es saliente en todo momento. En cambio, durante el ensayo del componente con la ventana, el flujo de las *tiles* supera en muchos momentos la potencia inyectada por el calefactor, lo que refleja la existencia de ganancia solar. También se producen flujos negativos de calor en la envolvente, aunque la temperatura de aire en la sala de ensayos siempre sea superior a la del ambiente exterior, como se puede ver en la Figura 3.37.

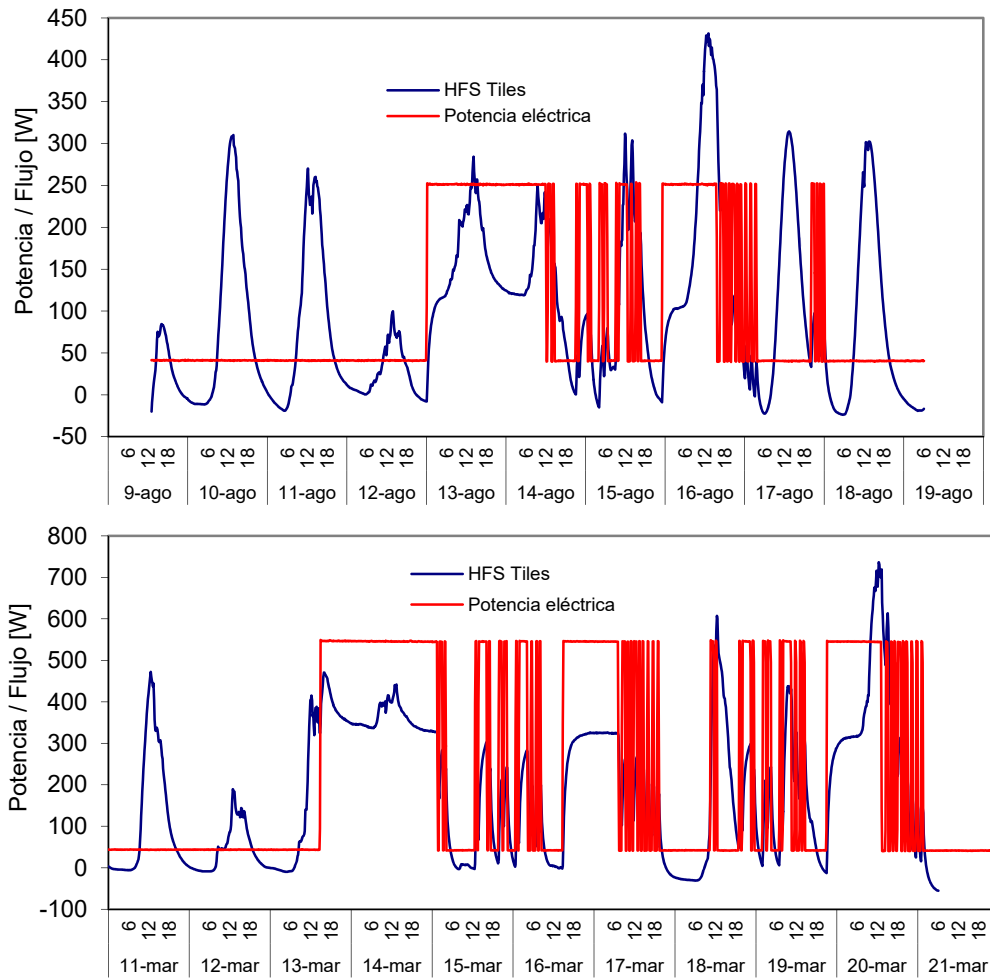


Figura 3.33 – Potencia introducida y flujo de la envolvente durante el primer ensayo, gráfica superior, y del segundo ensayo, gráfica inferior, de la ventana

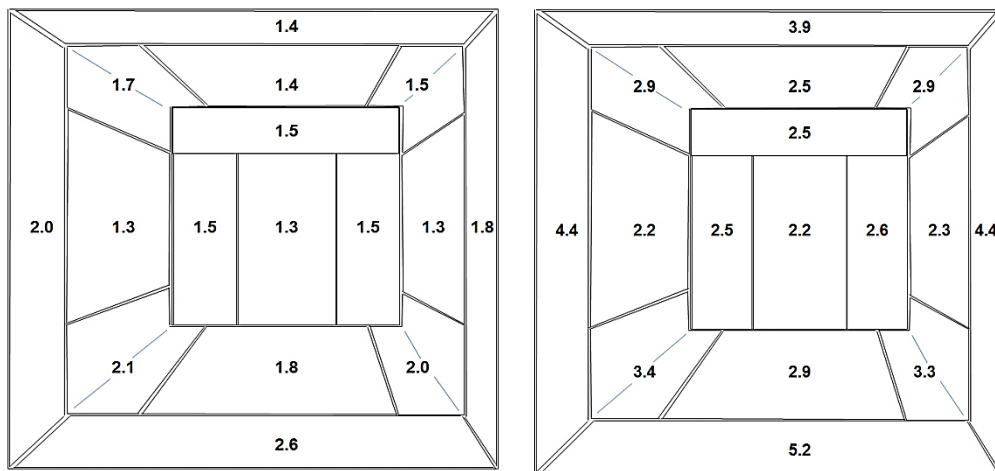


Figura 3.34 – Valor medio de la densidad de flujo de calor $[W/m^2]$ medido por cada grupo de *tilas* durante el primer ensayo de la ventana, izquierda, y durante el segundo ensayo, derecha

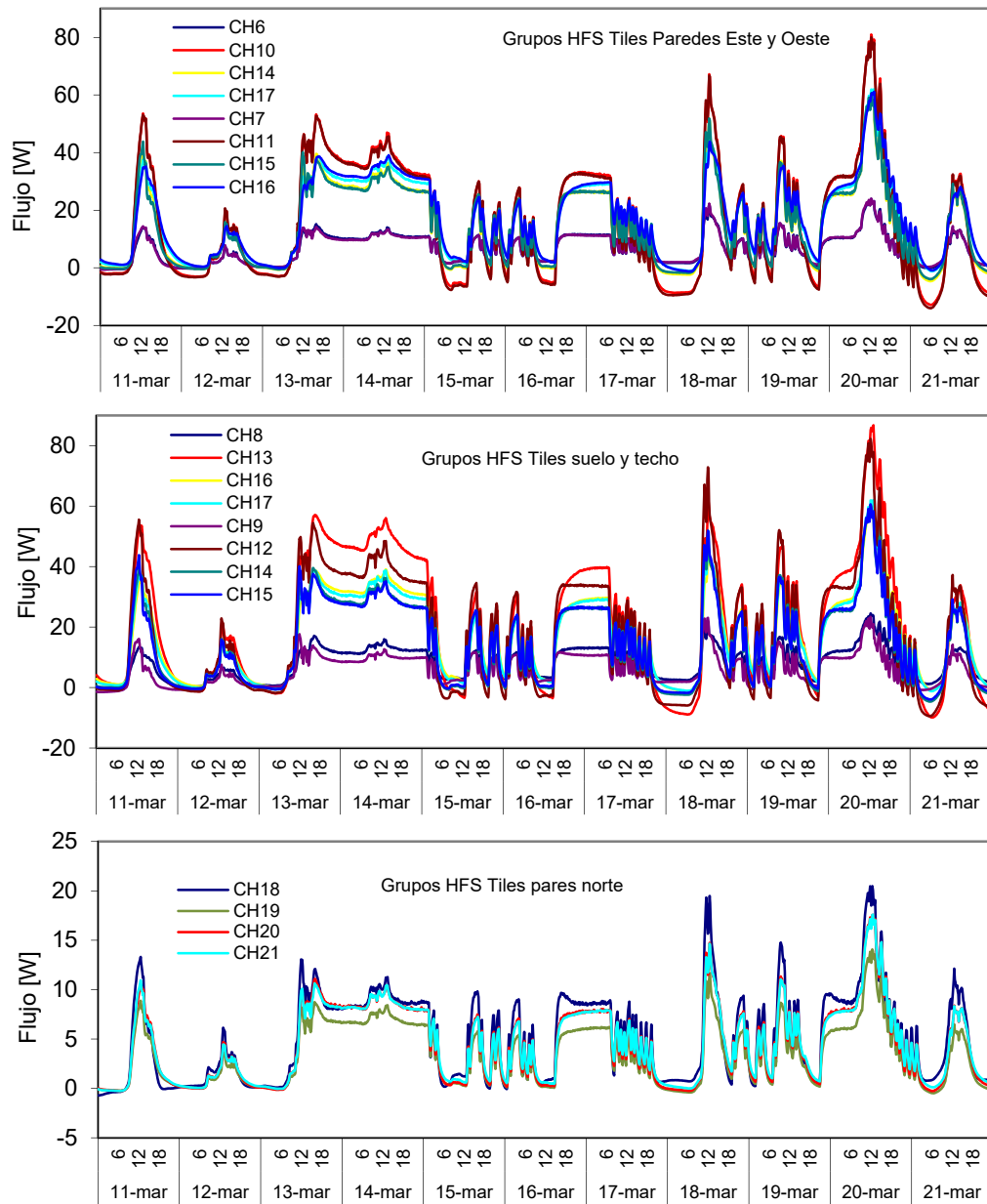


Figura 3.35 – Flujos de calor registrados por cada grupo de HFS Tiles durante el segundo ensayo de la ventana

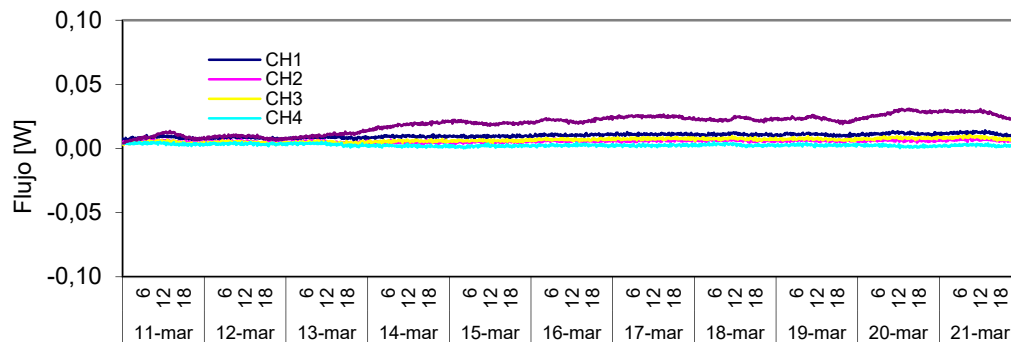


Figura 3.36 – Ruido de medida del flujo registrado por las tiles durante el segundo ensayo de la ventana

Este comportamiento se debe al aumento de la temperatura superficial de las *tiles* durante los periodos de ganancia solar y la posterior descarga hacia el ambiente interior. Esta evolución del flujo demuestra que la cortina negra que se ha colocado en la parte interior de la ventana actúa adecuadamente, transformando la radiación solar transmitida por la ventana en calor convectivo en el ambiente de la sala de ensayos, sin que se produzca intercambio radiativo con las superficies de las *tiles*. Es necesario indicar que, durante el segundo ensayo, en la rutina de calentamiento se repite la segunda parte de la excitación *ROLBS*, para asegurar un desacoplamiento de las condiciones interiores del ambiente, debido a la baja incidencia solar que se produce durante los días centrales. En la Figura 3.34 se muestran los flujos promedios por unidad de superficie en cada uno de los grupos de *tiles* de la envolvente de la sala de ensayos. Aunque, el flujo total que atraviesa la superficie de la envolvente ha modificado sus características debido al efecto de la ganancia solar, los flujos promedios que se registran en cada grupo individual mantienen un comportamiento coherente. Los flujos de borde son superiores a los flujos centrales de cada superficie, y los valores correspondientes al suelo alcanzan las máximas tasas, respecto a las paredes y techo. A su vez, se puede ver cómo se mantiene la simetría de flujos entre la orientación este y oeste. Este comportamiento se verifica, no solo en los valores promedios, sino también, en los valores instantáneos, como se puede ver en la Figura 3.35. Los grupos gemelos presentan un comportamiento totalmente simétrico, tanto en forma, como en valores de flujo.

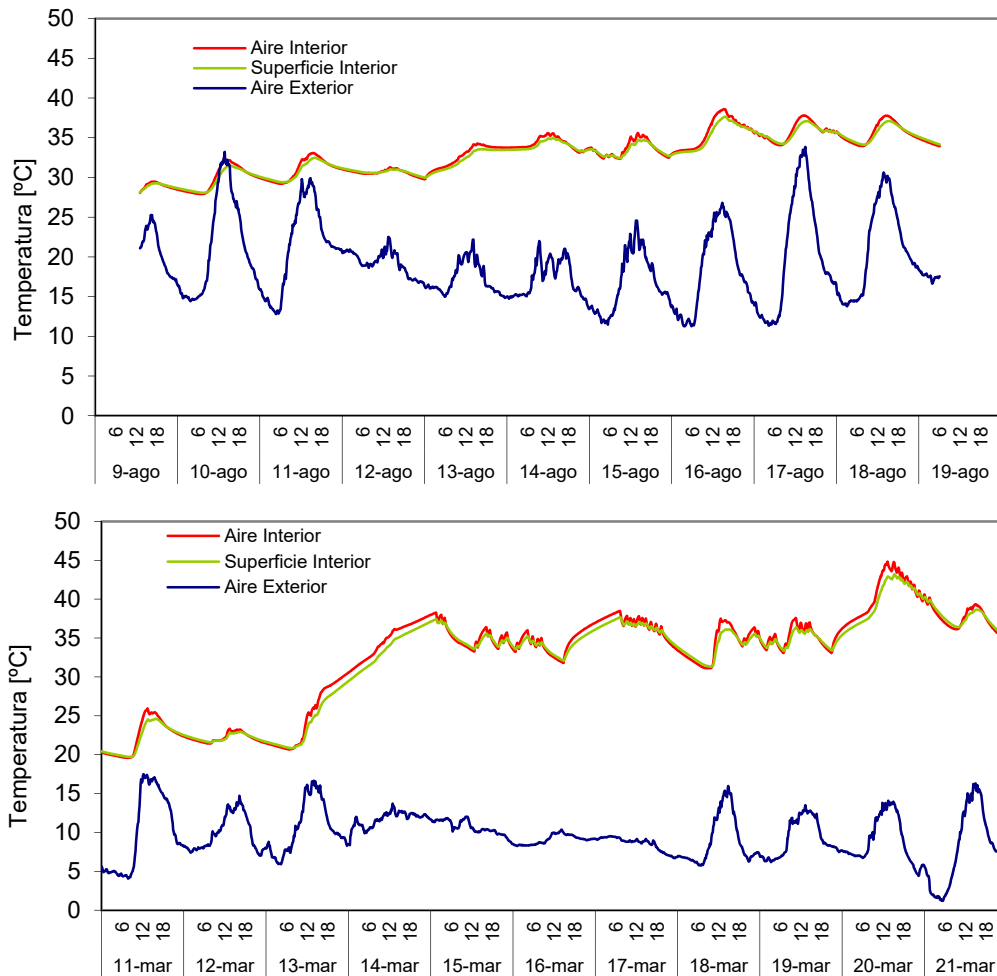


Figura 3.37 –Evolución de las temperaturas en la sala de ensayo y del ambiente exterior para la ventana

El ruido de lectura del sistema de medida y adquisición de la señal eléctrica de las *tiles* aporta un error en la medida muy inferior a 0,1 [W], como se puede ver en la Figura 3.36. En ella se observa que el ruido registrado en el grupo 5 presenta una desviación respecto al comportamiento de ruido blanco, al igual que sucedía en los ensayos del muro opaco, debido el efecto del calefactor, pero sin generar una incidencia representativa. Al emplearse la mitad de potencia de calefacción en la resistencia eléctrica durante el primer ensayo, frente al segundo, los flujos de calor son más reducidos, al igual que la temperatura de ambiente interior de la sala de ensayo, como se puede ver en la Figura 3.37. Durante el primer ensayo se alcanzan temperaturas de aire interior máximas próximas a los 40°C, pero durante el segundo ensayo, se rozan los 45°C, que corresponden al límite superior de operación. Estas altas temperaturas no sólo se deben a la potencia de calefacción, también se deben a las ganancias solares.

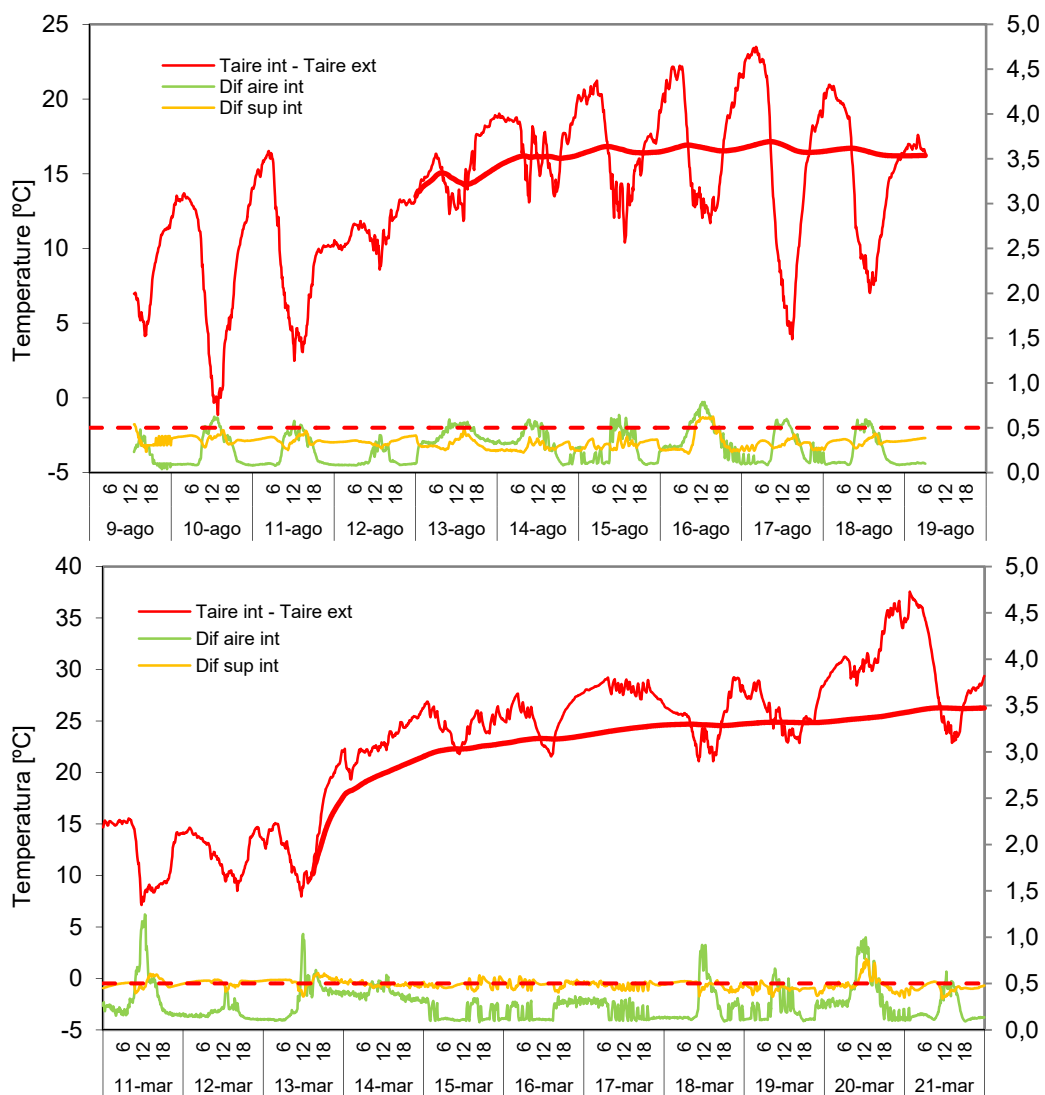


Figura 3.38 –Salto de temperatura entre ambientes y homogeneidad de las temperaturas de aire y superficie interior en el ensayo de la ventana

El primer ensayo se lleva a cabo en verano, con una componente solar sobre la superficie vertical más reducida que en el segundo ensayo, que se realiza en primavera.

Se puede observar que la temperatura de aire interior permanece por encima de la temperatura de ambiente exterior durante todo el periodo de ensayo, salvo en algunos instantes del periodo de inicialización, en el que la celda evoluciona de forma libre. Un punto importante es que la evolución de las temperaturas de la sala de ensayo verifican las medidas del flujo de la envolvente mostradas en la Figura 3.33. Los periodos en los que el sentido del flujo se invierte coinciden con los instantes de tiempo en los que la temperatura superficies es superior a la temperatura de ambiente, ver Figura 3.37. Esto corrobora la existencia de ganancia solar durante los periodos de irradiación, que permite que la superficie de las *tiles* acumule parte de estas ganancias, que posteriormente descarga, cuando descienden la temperatura de ambiente interior. En cuanto a las prestaciones del ensayo, el salto promedio entre ambientes es de 15°C para el primer ensayo, y superior a 25°C para el segundo, Figura 3.38.

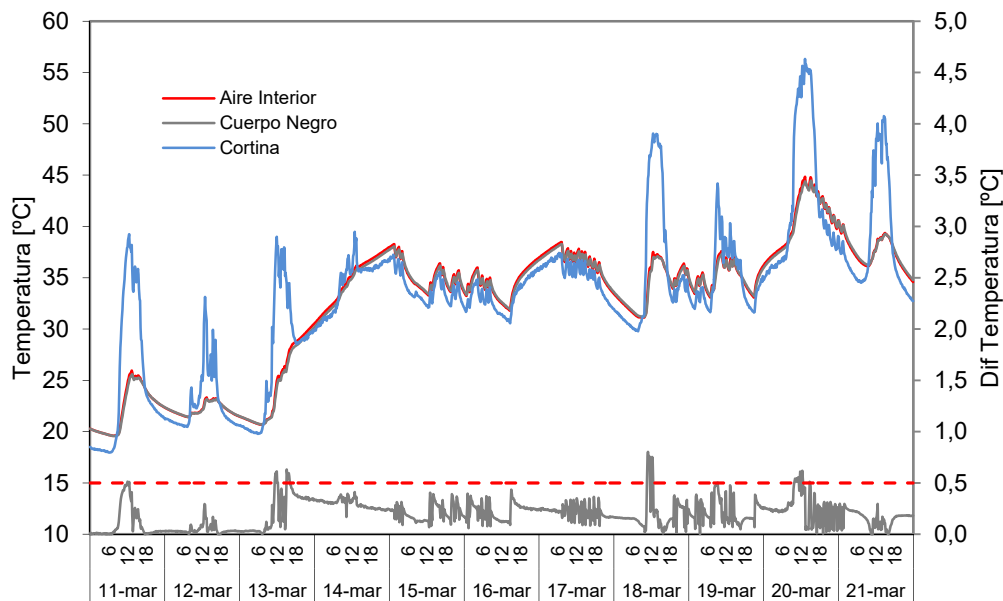


Figura 3.39 – Comparación entre la temperatura media del ambiente, la temperatura de cuerpo negro, y la temperatura del aire entre la cortina de protección de las *tiles* y la ventana del segundo ensayo del IQ-Test

En estos ensayos la diferencia entre las temperaturas de aire supera puntualmente el límite de los 0,5°C, principalmente, en los momentos de ganancia solar. Pero estos instantes son puntuales, y se producen únicamente en los periodos de evolución libre. Durante los periodos en los que está activa la rutina de calefacción, y en promedio, durante todo el periodo de ensayos, se cumplen las condiciones de homogeneidad de la temperatura del ambiente interior. Las temperaturas de superficie de la envolvente se mantienen dentro de una diferencia del orden de los 0,5°C, sin producirse grandes variaciones a lo largo del ensayo. Además de evaluar la homogeneidad de la temperatura registrada por las siete sondas de aire de la sala de ensayos, la medida de la temperatura de cuerpo negro, permite verificar que no se produce un intercambio radiativo entre las superficies, condición necesaria para la validez de los modelos planteados en el capítulo anterior, ver Figura 3.39. Los mecanismos que se han planteado para modelizar el intercambio energético se basan en la convección y conducción, ambos regidos por ecuaciones lineales. Si se producen diferencias apreciables en las temperaturas entre superficies, o entre éstas y el ambiente, se sumaría a los mecanismos de transmisión el intercambio por radiación, que responde a ecuaciones no lineales^[405], que aumentan la complejidad de los modelos de la sala de ensayos y, por tanto, reducen la eficacia en la caracterización de la muestra bajo ensayo. En la Figura 3.39 se puede ver cómo la temperatura de cuerpo negro no difiere

más de 0,5°C respecto a la temperatura media del ambiente, salvo instantes puntuales. Por ello se puede considerar que la cortina que se ha colocado en la sala de ensayos protege adecuadamente la superficie de *tiles* de la incidencia solar.

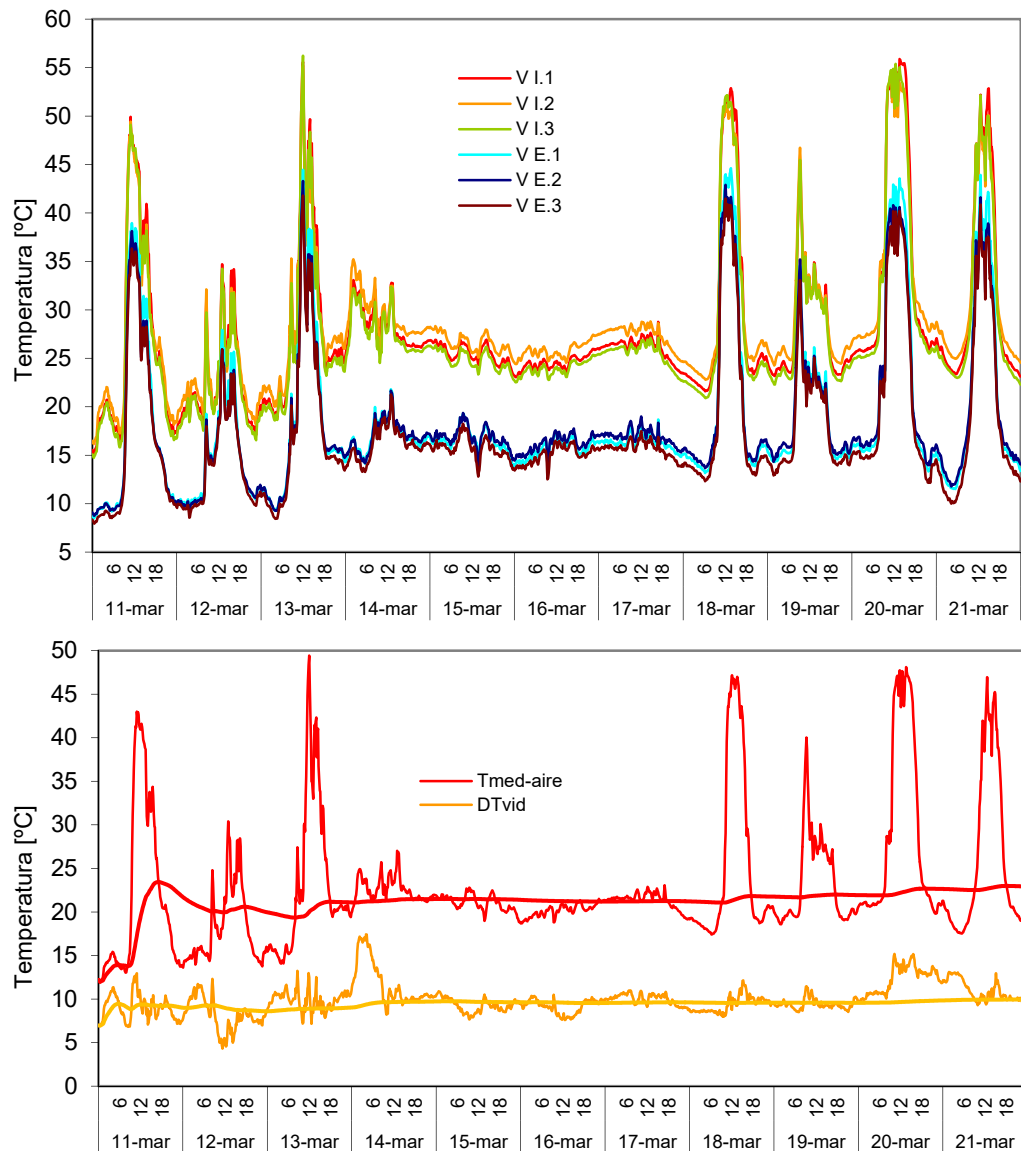


Figura 3.40 –Evolución de la temperatura en el vidrio interior y exterior de la ventana, para la zona central (.1), lateral oeste (.2) y esquina inferior oeste (.3), y valores medios de temperatura del aire de la cámara y del salto de temperatura entre vidrios

Además, observando la temperatura del aire en el espacio que separa la cortina de la ventana, se comprueba que en los momentos de elevada radiación solar, se producen aumentos importantes de la misma, con diferencias que pueden llegar al orden de los 15°C respecto a la temperatura del ambiente interior de la sala de ensayos. Por tanto, se concluye que está funcionando adecuadamente el planteamiento inicial, y la radiación que se transmite a través del vidrio incide sobre la cortina que la absorbe, calentando el aire de la cámara de 20 [cm], que lo transmite por convección a la zona interior de la sala de ensayos. De todas formas, la validez real se verifica más adelante, cuando se comparan los resultados de los modelos de identificación con los resultados del resto de centros participantes en el ensayo interlaboratorio, y las propiedades

estimadas de los componentes de la ventana. En el caso de la ventana, la transmitancia de la parte vidriada depende de la temperatura media del aire contenido en la cámara, y del salto de temperatura entre los vidrios.

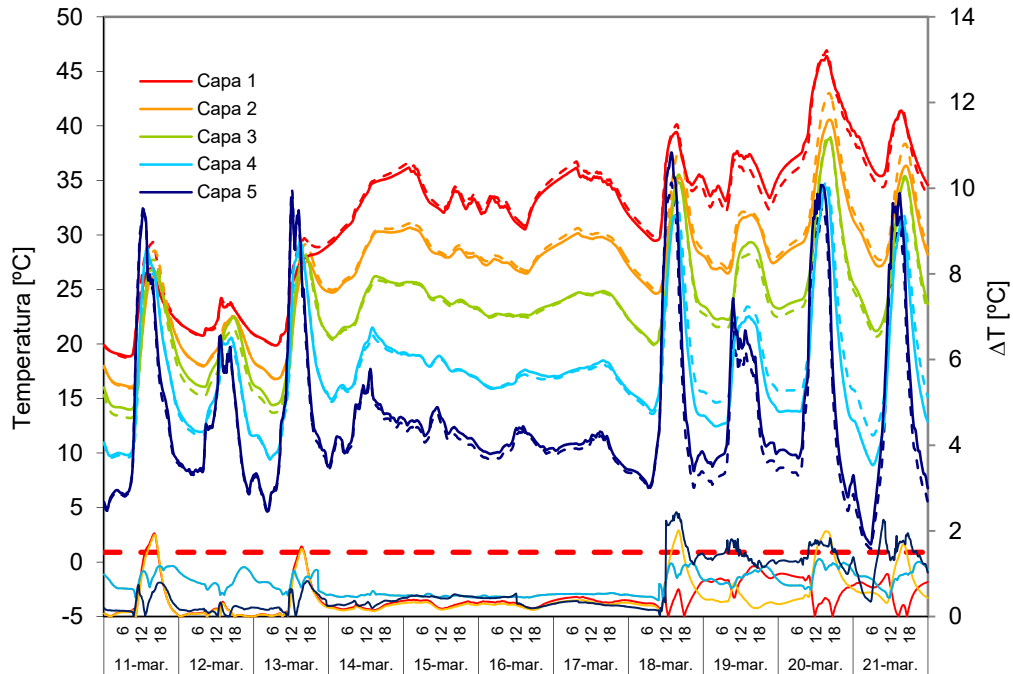


Figura 3.41 – Temperaturas en cada capa del anillo perimetral de la segunda muestra del IQ-Test. En línea continua las temperaturas de la esquina inferior este y en línea discontinua las del centro del lateral este

Por tanto, es necesario disponer de ambos valores, y aunque, medir la temperatura superficial de un vidrio presenta elevada incertidumbre, el dato de las tres sondas colocadas en la superficie interior y exterior, permiten disponer de unos valores aproximados de los mismos durante el ensayo, ver Figura 3.40. La temperatura de la cámara de aire, determinada como la media entre los vidrios que la delimitan, presenta valores que oscilan en gran medida, desde mínimos del orden de los 15°C a máximos que alcanzan los 50°C. Pero, en promedio durante el periodo de ensayo, dicha cámara de aire presenta una temperatura de 22,9°C. El salto de temperatura entre vidrios presenta un comportamiento más homogéneo, como era de esperar, para un componente sin inercia térmica, tomando un valor medio de 10,0°C para el ensayo. Una vez analizada la ventana, parte más importante del segundo componente del interlaboratorio, se revisa el comportamiento del perímetro aislante. Al tratarse de una muestra heterogénea con características térmicas muy diferentes en cada una de sus partes, presenta una zona central muy conductora frente a la zona perimetral muy aislante, cada uno de los componentes puede verse afectado entre sí. En la Figura 3.41 y Figura 3.42 se muestra la evolución de las temperaturas internas del anillo aislante. Se puede apreciar cómo se ve afectado el campo de temperaturas en el anillo perimetral de aislante por el cambio de la zona central por la ventana. Al inicio del ensayo, cuando la diferencia de temperaturas entre el aire de la sala de ensayos y el ambiente exterior es pequeña, la temperatura en la zona central del eje este, posición B, y en la esquina inferior este, posición C, ver Figura 3.4, evolucionan de forma idéntica. Pero, cuando entra la rutina de calentamiento, y la diferencia de temperatura aumenta, las temperaturas comienzan a separarse, principalmente durante los periodos extremos de excitación, momentos de máxima radiación solar diurna, y momentos de mínimas temperaturas nocturnas. Una forma más precisa de cuantificar el comportamiento del anillo perimetral se puede obtener mediante el análisis del campo

de temperaturas en la sección central. En la Figura 3.42 se muestra, junto con la medida de cada sonda de temperatura, la diferencia máxima respecto al valor medio. Esta diferencia máxima tiene un valor promedio de $0,92^{\circ}\text{C}$, generándose picos máximos que no superan los $1,5^{\circ}\text{C}$ en momentos correspondientes a las puntas de radiación exterior. Por todo esto, se puede considerar que, aun con el efecto de la ventana, la zona perimetral aislante del segundo componente se comporta de una forma homogénea.

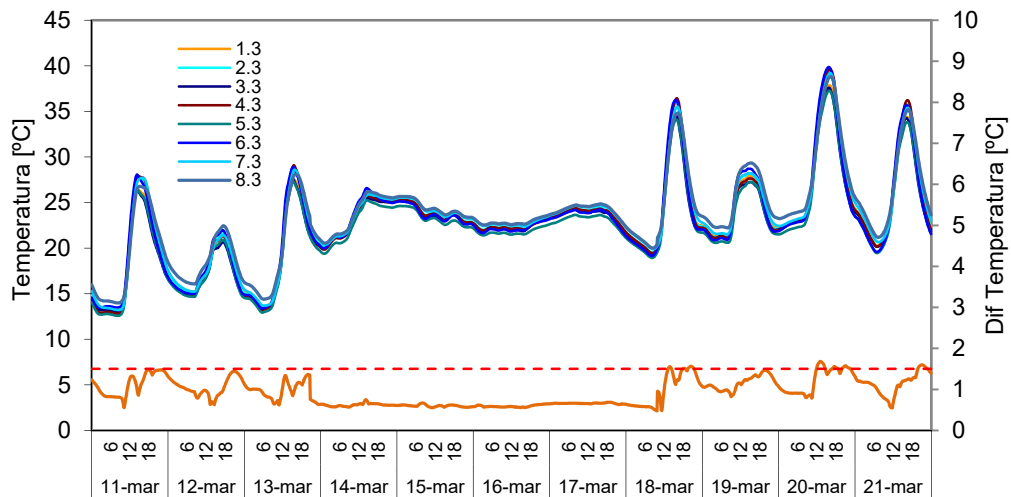


Figura 3.42 – Campo temperaturas en la sección central del anillo perimetral de la segunda muestra del IQ-Test

Verificados la validez de los datos experimentales de los ensayos, a continuación se pasa a aplicar los métodos de identificación de parámetros para la determinación de las propiedades térmicas de las dos muestras del ensayo interlaboratorio IQ-Test.

3.4 Modelos matemáticos de los componentes

Como se ha indicado en el apartado 3.2.2, el procedimiento de ensayo interlaboratorio está completamente definido y debe seguirse de forma estricta en cada centro implicado, para obtener un resultado útil a la hora de evaluar la capacidad de ensayo de la metodología PASLINK. El primer punto pasa por caracterizar con precisión el muro opaco, englobando la determinación del comportamiento de la zona central, con flujo unidimensional, y el efecto de borde, con la caracterización de la superficie completa. Este primer punto, aunque el más sencillo, en principio, es condicionante de la precisión de los resultados del segundo ensayo. Finalmente, el estudio conjunto de los resultados obtenidos a nivel global de todos los centros permitirá evaluar, no sólo la calidad de la metodología de ensayo, sino también la calidad de ensayo de la propia celda EGUZKI, siendo ésta una evaluación fundamental para poder disponer de una base de ensayos fiable para el posterior estudio del comportamiento energético de las fachadas ventiladas.

3.4.1 Modelo del muro opaco

El primer punto a determinar es la transmitancia unidimensional de la zona central U_A , empleando como funciones de entrada los datos correspondientes a las temperaturas

de superficie, y como función objetivo el flujo medido por el fluxímetro de la cara interior. Se emplea para ello un modelo de segundo orden, ver Figura 3.43, seleccionado tras aplicar la metodología empleada en el apartado 2.3.3, de forma que es el modelo que mejor cumple el compromiso complejidad frente a precisión de los resultados. Los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos se recogen en la Tabla 3.3, y en la Figura 3.44 y Figura 3.45 se muestran las funciones de entrada al modelo, y los residuos de ajuste para el flujo de calor, junto con el análisis de los coeficientes de autocorrelación y periodograma integrado de los mismos. En el primer ensayo, teniendo en cuenta el reducido valor medio del residuo en el ajuste del flujo de calor, que es de 0,17 [W], y la forma del mismo, se puede aceptar la hipótesis de ruido blanco.

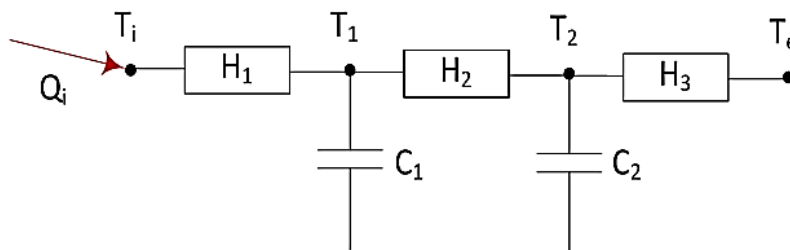


Figura 3.43 – Modelo de segundo orden empleado en la determinación de la transmitancia del perfil central, U_A , del muro opaco

	R_A [m ² K/W]	C_A [KJ/m ² K]	Residuo [W]
1º ensayo	6,027	7,908	0,17
2º ensayo	6,117	8,090	0,15

Tabla 3.3 – Resultados del modelo para el perfil central

Para el segundo ensayo, los resultados que se obtienen presentan un valor aún menor, de 0,15 [W]. Como se puede ver, el mayor salto de temperatura entre ambientes, con un valor promedio del orden de 25°C, frente a los 10°C del primer ensayo, permite obtener unas condiciones de estudio de identificación de parámetros mejores. No sólo los residuos obtenidos del modelo son menores, sino que también es mejor el ajuste del modelo al espectro de ruido blanco que en el primer ensayo. Aun así, los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades térmicas son equivalentes, con diferencias tan solo del 1,5% y del 2,2% en los valores de resistencia y capacidad respectivamente. Una forma más descriptiva de evaluar el efecto de las condiciones de ensayo en la calidad de los resultados es analizar la superficie de residuos que se obtiene en cada uno de los casos. Como se indica en el apartado 2.3.1 del capítulo anterior, el proceso de identificación de parámetros se basa en la búsqueda de un mínimo de la función objetivo bajo estudio para un rango de las variables a determinar. En este caso, se busca obtener la resistencia y la capacidad térmica del muro opaco que mejor representan el flujo medido, bajo las temperaturas superficiales a las que ha estado sometida la muestra. En la Figura 3.46 se muestra dicha superficie de residuos. Al tratarse de una muestra homogénea, la superficie teórica debe presentar una forma cóncava y lisa, con un único mínimo. Como se puede apreciar, el resultado experimental cumple esta premisa, pero dicha superficie presenta algo de rugosidad, debida al ruido del ensayo. Cuanto mayor sea la perturbación de los datos, debido a causas como el ruido de medida de la instrumentación, desviación del modelo frente al proceso de transmisión de calor real, participación del equipo de ensayo en el

comportamiento de la muestra, etc..., mayor será la rugosidad de dicha superficie, y por tanto, más complejo será determinar las propiedades bajo estudio. Para el caso del primer ensayo, la superficie de residuos presenta un comportamiento próximo al teórico, luego las condiciones de ensayo son adecuadas.

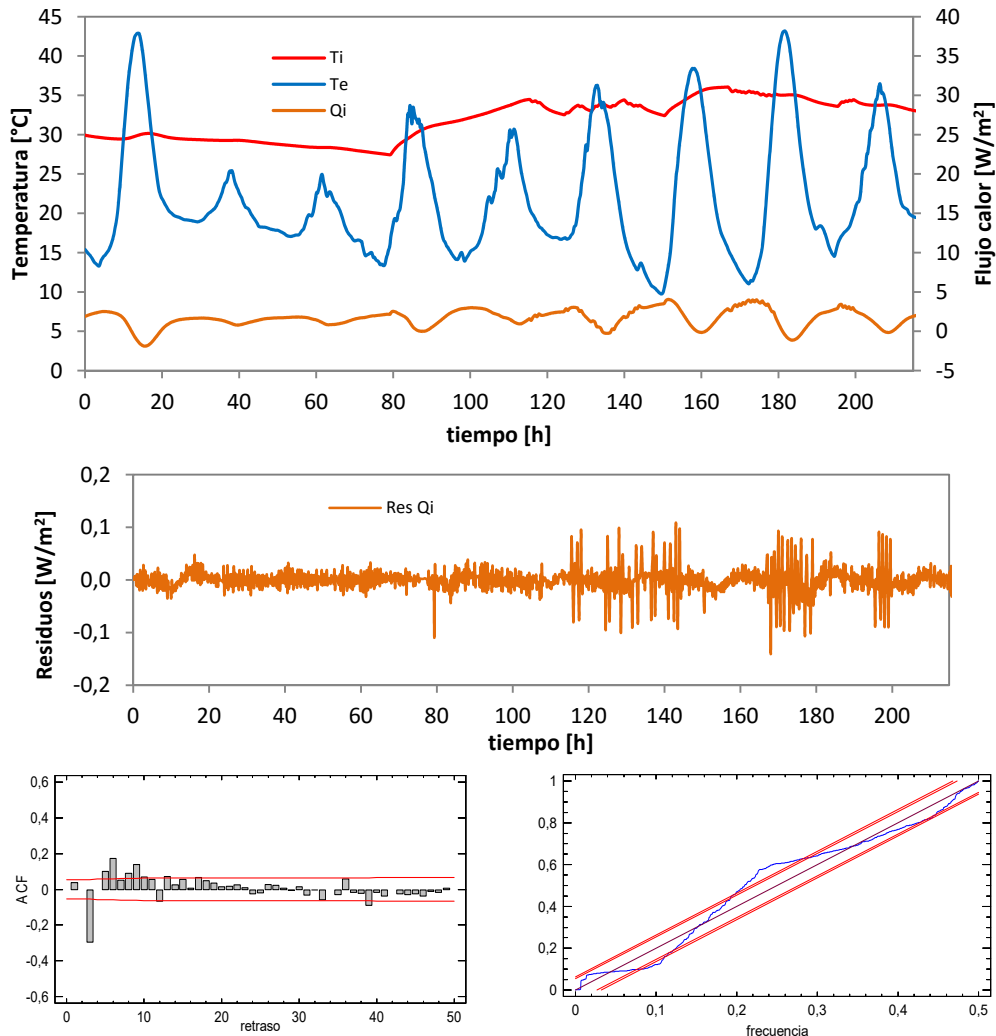


Figura 3.44 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la determinación de la transmitancia del perfil central U_A del primer ensayo

A la hora de analizar dicha superficie de residuos cabe destacar varios puntos de interés que se pueden deducir de su forma y características. El primer punto, es el apuntamiento o pendiente en cada uno de los ejes. En las imágenes centrales de la Figura 3.46 se muestran las proyecciones de la superficie de residuos en cada uno de los ejes, a la izquierda la proyección sobre el eje de resistencia térmica, y a la derecha, sobre el eje de capacidad térmica. Se puede ver cómo en el eje de la resistencia térmica el apuntamiento de la superficie es elevado, lo que facilita la determinación del valor real, reduciendo la incertidumbre en su determinación. Para un intervalo de confianza del 95% la resistencia térmica se obtiene con un error inferior al 1,9%. Sin embargo la determinación de la capacidad térmica presenta mayor complejidad. En la proyección sobre el eje de capacidad, se puede ver que los valores van desde 6 [KJ/m²K] hasta 10 [KJ/m²K], presentan un residuo muy próximo, sin un mínimo nítido. En este caso, el error de determinación para el mismo intervalo de confianza es del 15,4%. Aun así, el resultado obtenido es correcto.

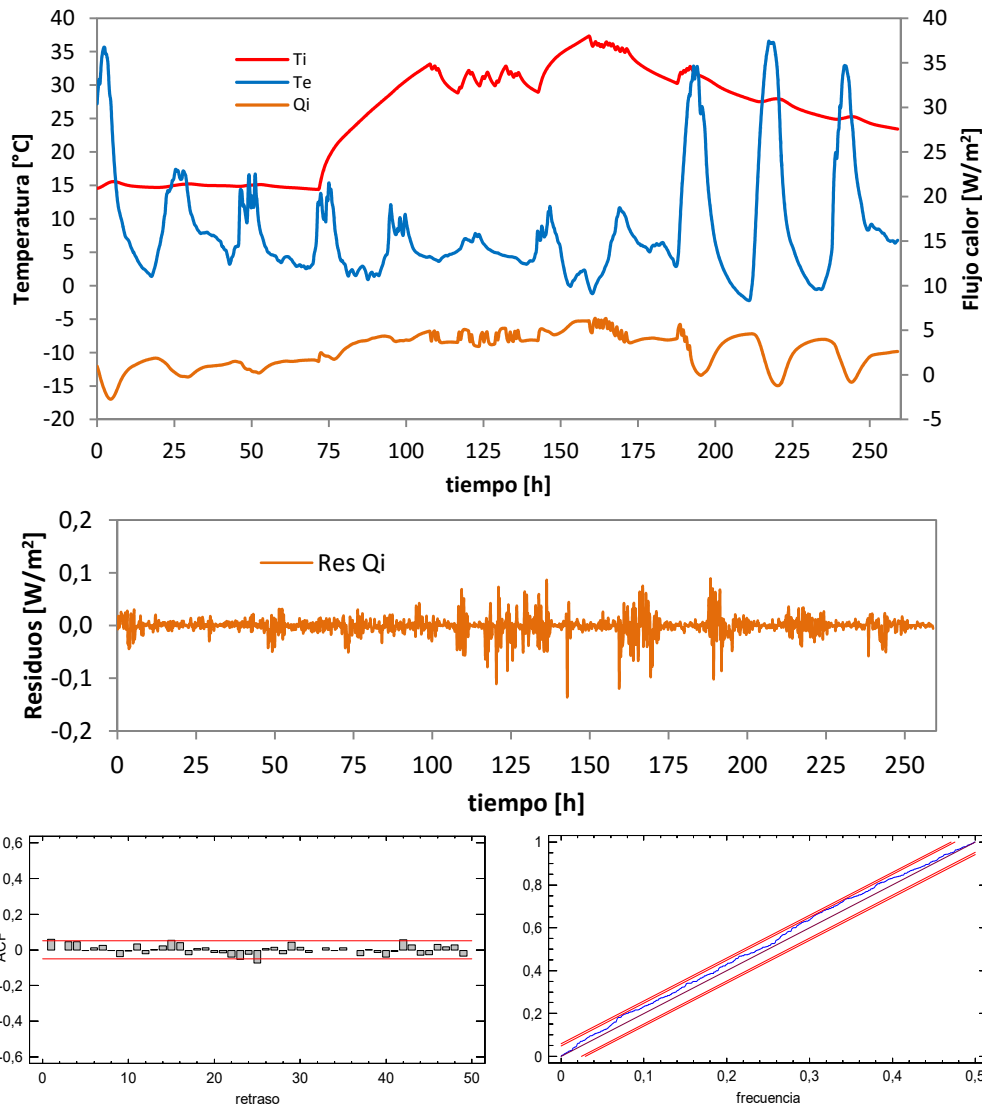


Figura 3.45 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la determinación de la transmitancia del perfil central, U_A del segundo ensayo

Este comportamiento es una constante en los procesos de identificación de parámetros^[12,20]. La caracterización de la capacidad térmica es compleja y se necesita de experiencia y herramientas de análisis complementarias, como la evaluación de los coeficientes de autocorrelación, para poder determinar con fiabilidad dichos valores. Tal como se desarrolla en el capítulo anterior, si los parámetros del proceso de identificación, en este caso el vector de transmitancias, H_i , y capacidades térmicas, C_i , del modelo de la Figura 3.43 presentan correlación entre sí, la proyección de la superficie de residuos sobre los ejes de las variables es elíptica y dispuesta sobre una de las diagonales del plano. En este caso, como se puede observar en la última imagen de la Figura 3.46 se aprecia este efecto de autocorrelación, aunque cuando se evalúan dichos coeficientes, ver Anexo B, ninguno alcanza valores próximos a la unidad, por lo que esta correlación no tiene un efecto representativo en la validez de los resultados. Para el segundo ensayo del muro opaco, en la Figura 3.47 se muestra la superficie de residuos. En este caso, las condiciones experimentales son mejores, con un salto de temperatura entre ambientes muy superior, lo que permite obtener flujos de calor de mayor magnitud. Estas condiciones se deben reflejar en unas mejores características para el proceso de identificación de parámetros.

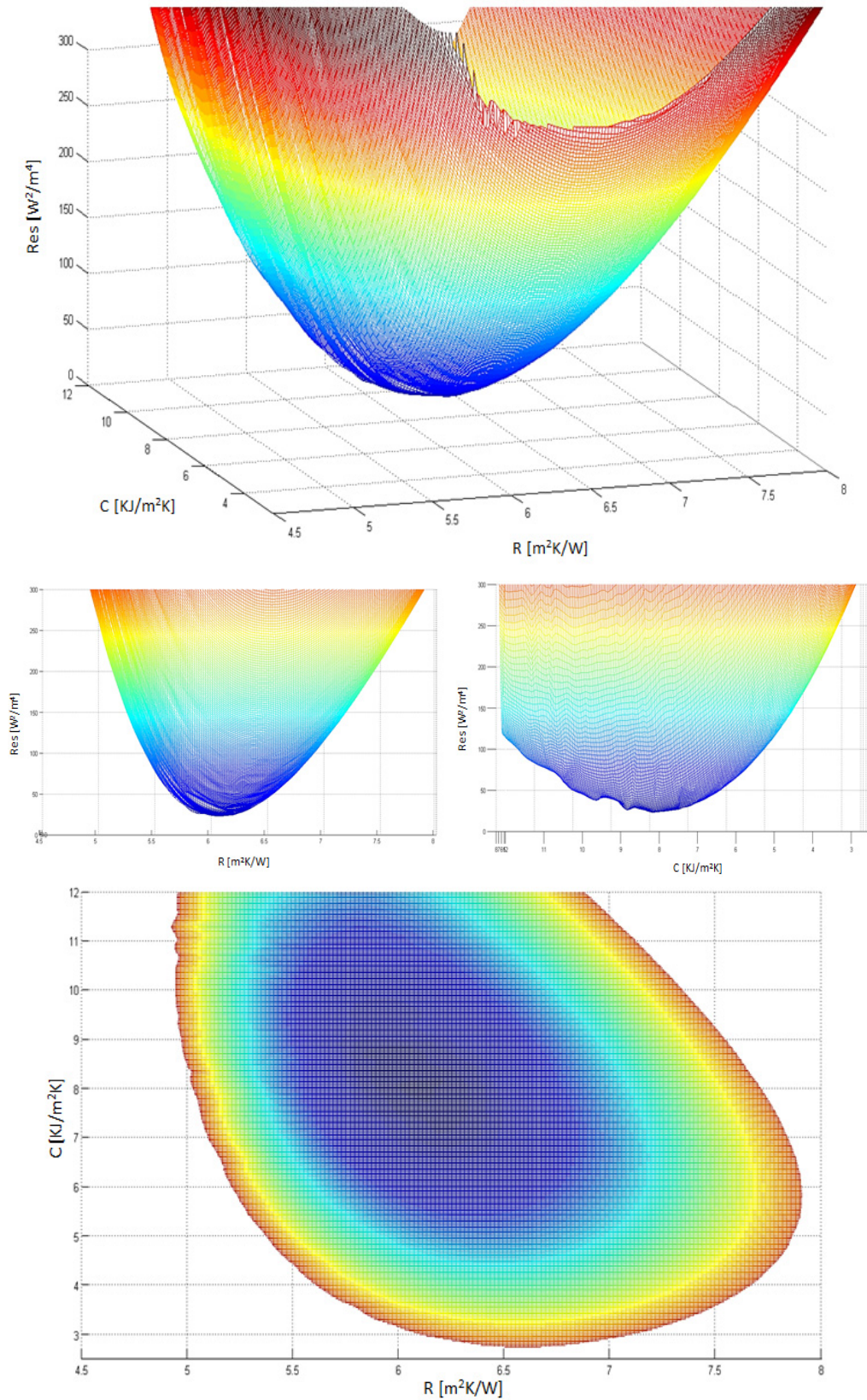


Figura 3.46 – Superficie de residuos en el proceso de identificación de parámetros para el perfil U_A del muro opaco en el primer ensayo

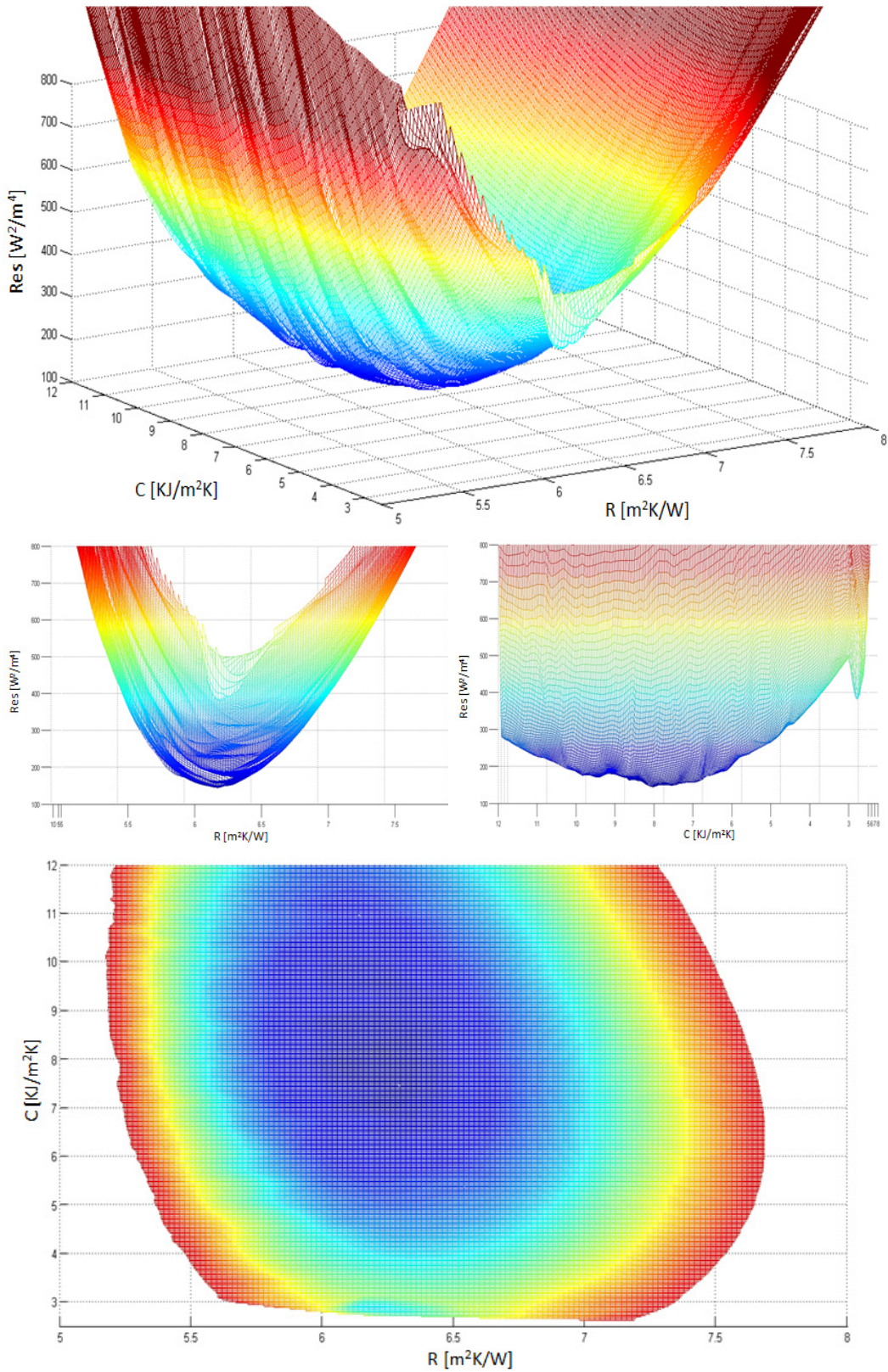


Figura 3.47 – Superficie de residuos en el proceso de identificación de parámetros para el perfil U_A del muro opaco para el segundo ensayo

Se puede ver que la superficie presenta mayor rugosidad. En un principio, esto implicaría mayor perturbación y ruido en los datos. Pero si se observa el eje de residuos, al tratarse del cuadrado de la diferencia entre el vector medido y el vector calculado por el modelo, pequeñas variaciones en los parámetros del modelo se traducen en grandes variaciones en el residuo. En cuanto a la identificación de parámetros, se mantienen las condiciones respecto al ensayo anterior. La determinación de la resistencia térmica sigue presentando mucha mejor resolución que la determinación de la capacidad térmica. El valor de resistencia se obtiene con una incertidumbre de 0,4%, mientras que la capacidad presenta un 9,3%. Estas incertidumbres son muy inferiores a las que se obtienen en el ensayo anterior. Y si se observa la proyección de la superficie de residuos se puede comprobar cómo se ha reducido la correlación entre parámetros del modelo, al presentar un patrón prácticamente circular sin inclinación de los ejes.

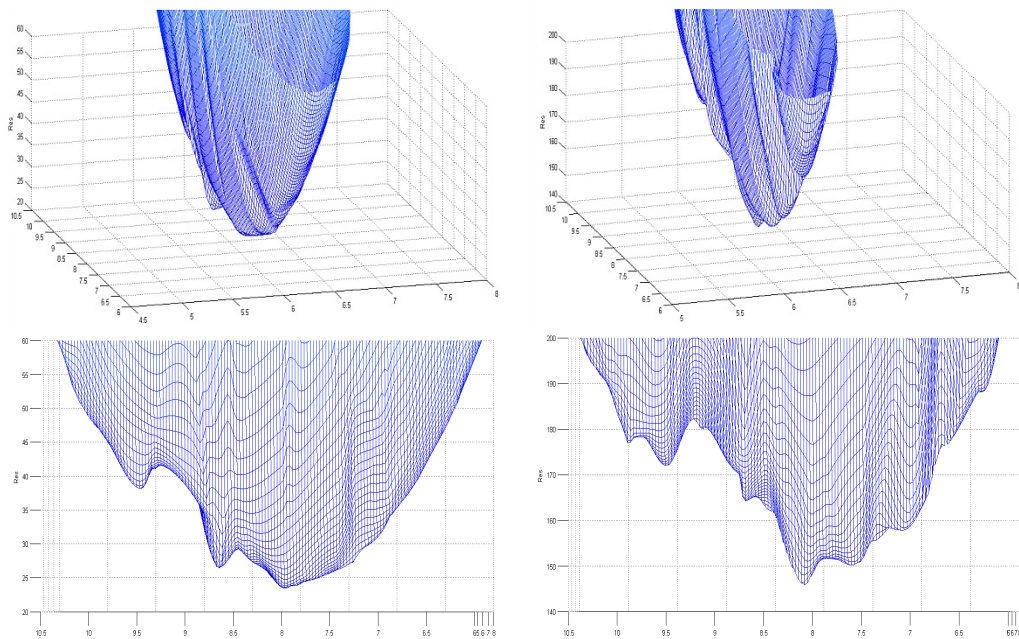


Figura 3.48 – Ampliación de la zona del mínimo absoluto de las superficies de residuos, izquierda primer ensayo y derecha segundo ensayo

Hay que recordar que estos valores de error únicamente cuantifican la incertidumbre del proceso de identificación de parámetros, y en gran medida vienen determinados por la precisión con la que se ha obtenido un mínimo absoluto en la superficie de residuos, y lo acotado que es este mínimo. El error final del ensayo debe obtenerse mediante el proceso de propagación de incertidumbres, incluyendo el efecto del error de medida de la instrumentación. Pero de todos modos, la incertidumbre del proceso de identificación es una componente más del error final del resultado del ensayo, y cuanto menores sean en cada componente menor incertidumbre final se obtendrá. Para poder analizar las diferencias en las incertidumbres del proceso de identificación, en la Figura 3.48 se muestra una ampliación de la zona correspondiente al mínimo absoluto de la superficie de residuos, para cada uno de los ensayos. En el segundo ensayo aparece un mínimo único claro, con un apuntamiento de la superficie, mientras que en el caso del primer ensayo, la zona del mínimo presenta una menor pendiente de la superficie de residuos. Además, cabe destacar que el resto de mínimos locales que rodean el mínimo absoluto presentan valores de residuos claramente superiores para el caso del segundo ensayo, mientras que en el caso del primer ensayo, aparece un mínimo local muy próximo que puede generar fácilmente una identificación de

parámetros errónea. Por tanto, una vez analizadas las superficies de residuos, se ve claramente el efecto de las condiciones de ensayo sobre la precisión de los resultados, y por tanto es un aspecto muy importante a tener en cuenta. Pero, para poder cuantificar el efecto total sobre los resultados (si se aplica la aproximación de la ecuación de propagación de incertidumbres definida en la expresión [3.5]) teniendo en cuenta el error de medida de cada uno de los instrumentos que participan en el ensayo, ver Tabla 3.5 se obtienen los resultados finales de la incertidumbre para la determinación de la transmitancia del perfil central del muro opaco, Tabla 3.4.

	U_A [W/m ² K]	e_{UA} [%]
1º ensayo	0,166	5,3
2º ensayo	0,164	2,9

Tabla 3.4 – Resultados finales transmitancia unidimensional U_A para el perfil central del muro opaco

Una vez obtenido el valor de la transmitancia del muro opaco correspondiente a la zona de flujo unidimensional, el siguiente apartado del interlaboratorio es la determinación de la transmitancia del componente completo, considerando los efectos de borde del portamuestras. Este cálculo es interesante de cara a caracterizar el comportamiento de las condiciones del equipo de ensayo. Como se ha indicado con anterioridad, los dos ensayos del muro opaco se han llevado a cabo empleando diferentes condiciones ambientales, pero también situando la probeta con diferentes alineaciones respecto al anillo aislante del sistema de portaprobetas. En el primer ensayo el componente se ha situado a ras del borde exterior, mientras que en el segundo ensayo se ha situado a ras del borde interior. La primera configuración sería la óptima para la realización de ensayos, ya que se evitarían posibles sombreados debido al premarco, siempre y cuando el efecto de borde que se genere sobre la muestra no sea excesivo. Este análisis se puede realizar mediante los resultados del proceso de identificación de parámetros. Para el estudio se emplea el modelo de la Figura 3.49, en el que se representa el comportamiento del muro opaco mediante dos ramas de conductancias, de forma que se tiene en cuenta el comportamiento de la zona central, con flujo unidimensional, y el comportamiento de la zona perimetral, con el efecto de borde del portamuestras.

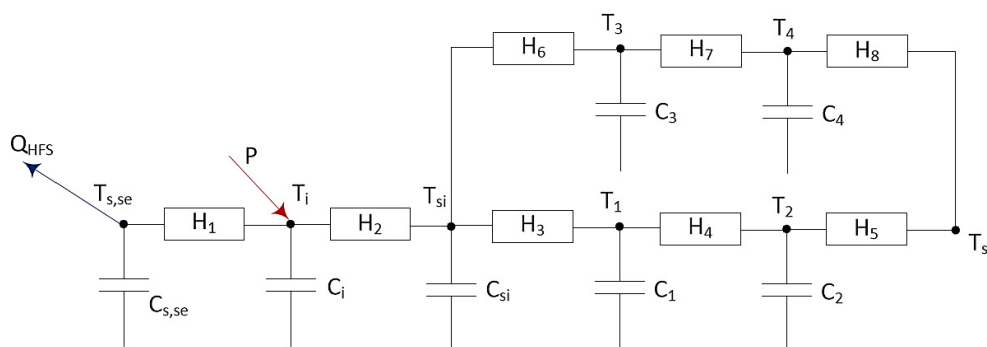


Figura 3.49 – Modelo del muro opaco completo con dos ramas para representar el efecto de borde

En la Figura 3.50 se muestra el análisis de residuos para la temperatura de aire interior, T_i , empleada como función objetivo en el proceso de identificación. Se puede considerar que ambos modelos presentan un patrón de residuos de ruido blanco, por lo que los resultados se toman como válidos. Aunque, comparando ambos resultados, los residuos del segundo ensayo son superiores en magnitud a los residuos del primer ensayo, sin embargo, el peridograma integrado presenta un mejor comportamiento.

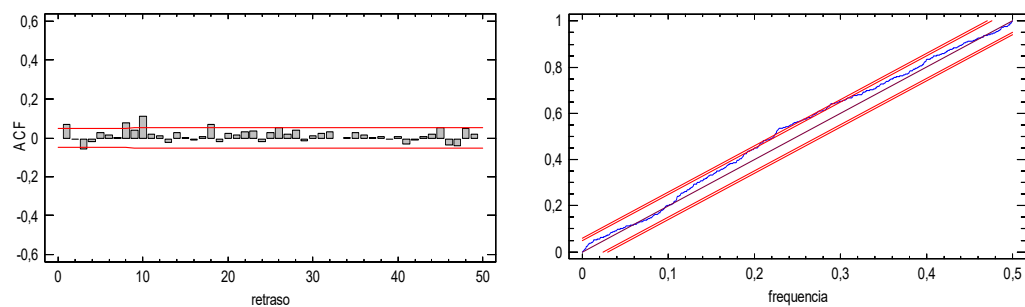
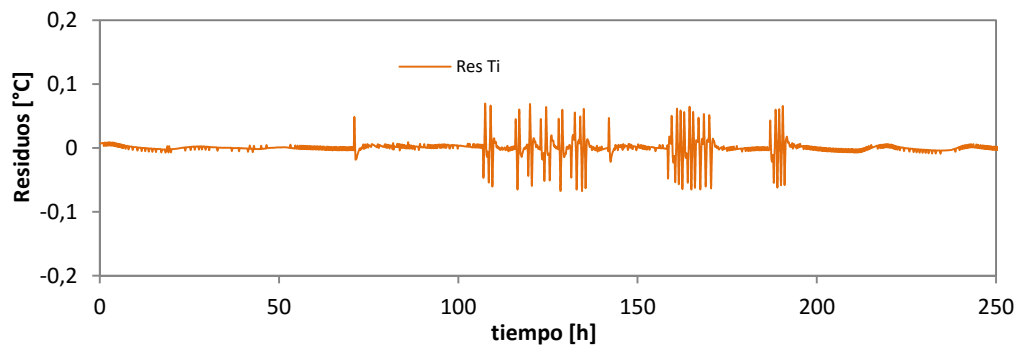
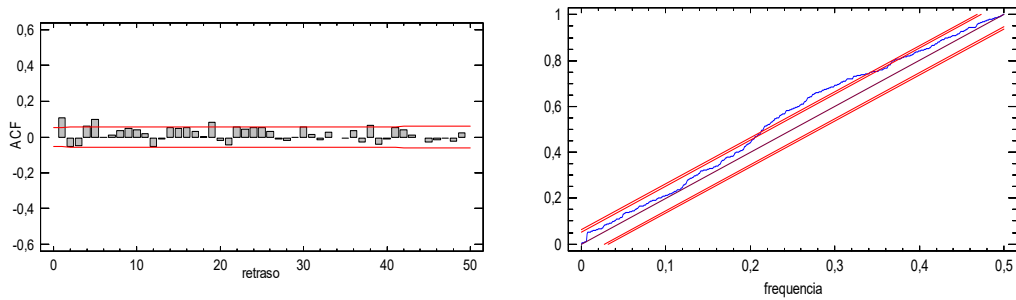
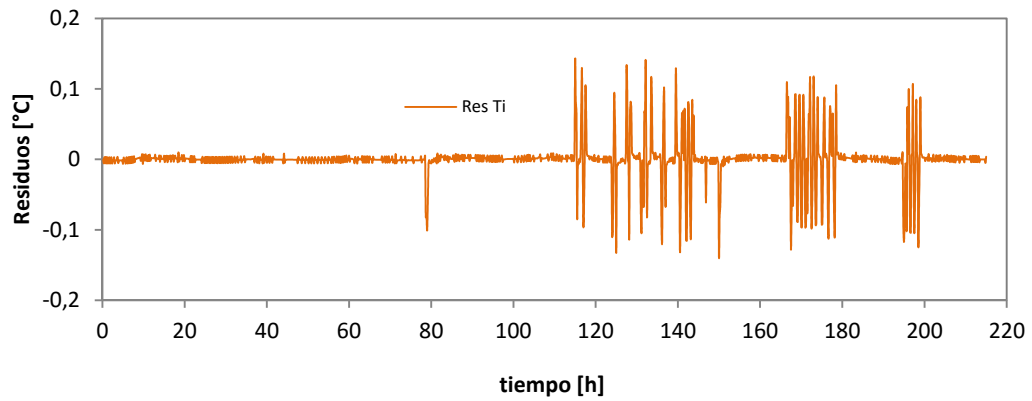


Figura 3.50 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro opaco, imágenes superiores, y para el segundo ensayo, imágenes inferiores

	U [W/K]	C [MJ/K]	e_U [%]	e_C [%]
1º ensayo	1,830	0,197	2,8	25,8
2º ensayo	1,569	0,183	3,5	13,4

Tabla 3.5 – Resultados del valor de transmitancia U y capacidad térmica C para muro opaco completo

En la Tabla 3.5 se recogen los resultados de la transmitancia y capacidad térmica total obtenida para el muro opaco en ambos ensayos. Analizando los resultados, es de destacar la diferencia de conductancias obtenidas. Si se toma como referencia la conductancia de la probeta sin efectos de borde, teniendo en cuenta el valor unidimensional obtenido anteriormente de $U_A = 0,164$ [W/m²K], el valor esperado, teniendo en cuenta que la superficie de la muestra es de $7,23$ [m²], debiera ser de $U = 1,186$ [W/m²K]. Por tanto, en el caso del primer ensayo, los efectos de borde generan un aumento de la conductancia medida de la muestra del 54,3%, y en el caso del segundo ensayo, el efecto de borde genera un aumento del 32,3%. En ambos casos es un efecto muy representativo en el resultado final. También hay que considerar que se trata de una muestra muy aislante, y por tanto, el efecto de los puentes térmicos tiene mayor influencia cuanto mayor es el aislamiento de la muestra bajo estudio. Esta magnitud de los efectos de borde exige un mayor análisis, de cara a poder disponer de resultados fiables a la hora de ensayar probetas cuyas características no sean tan acotadas y homogéneas, como es el caso del muro opaco empleado en el ensayo de interlaboratorio.

		RAMA 1	RAMA 2
1º ENSAYO	U [W/K]	0,599	1,231
	C [MJ/K]	0,061	0,136
2º ENSAYO	U [W/K]	0,763	0,806
	C [MJ/K]	0,081	0,102

Tabla 3.6 – Valores de conductancias y capacidades térmicas de cada rama del modelo de la Figura 3.49

Otro punto a destacar de los resultados de la Tabla 3.5 es el valor de la incertidumbre de las conductancias en los dos ensayos. En función de las condiciones en cada uno de los ensayos, y en base a los resultados del estudio de residuos, era de esperar que la incertidumbre de la medida fuera menor para el segundo ensayo frente al primero. Sin embargo esto no es así. Esto se debe a que el valor de incertidumbre absoluta, una vez aplicado la propagación de errores para cada caso, es del mismo orden, $u_U \approx \pm 0,050$ [W/K], y al obtenerse un mayor valor de conductancia, debido a los efectos de borde, para el primer ensayo, el error relativo es inferior. En cuanto a las capacidades térmicas, el valor esperado para la muestra completa, partiendo del resultado obtenido del ensayo unidimensional, $C_A \approx 8$ [KJ/m²K], sería de $C = 0,058$ [MJ/K] muy inferior a los resultados del modelo completo. Esto implica que el portamuestras está participando en gran medida en el comportamiento dinámico de la muestra. Hay que tener en cuenta que la probeta de muro opaco es muy ligera y, por tanto, dicho efecto es más notorio. En cuanto a las incertidumbres asociadas, son muy superiores a las que se obtienen en la determinación de la transmitancia. Pero como ya se ha analizado en el estudio unidimensional, la estimación de las capacidades térmicas presenta mayor complejidad en el proceso de identificación de parámetros, aunque el valor obtenido sea fiable. Realizando un análisis más detallado de los resultados, en la Tabla 3.6 se recogen los valores de conductancias y capacidades obtenidos en cada una de las ramas del modelo de la Figura 3.49 para cada ensayo. Como punto de partida, se estudian los resultados del segundo ensayo, ya que en éste se tienen más controlados los flujos de calor intercambiados por la envolvente de la sala de ensayos y por la muestra. El primer paso es determinar qué superficie de la probeta presenta condiciones de flujo unidimensional y compararla con la superficie que se ve afectada por los efectos de borde del portamuestras. Teniendo en cuenta que la rama 1 representa la componente de flujo unidimensional, y tomando el valor de conductancia central obtenido anteriormente, $U_A = 0,164$ [W/m²K], la superficie de la muestra que no se ve afectada por los efectos de borde sería de $4,65$ [m²].

		RAMA 1	RAMA 2
1º ENSAYO	U [W/m ² K]	0,164	0,344
	S _U [m ²]	3,65	3,58
2º ENSAYO	U [W/m ² K]	0,164	0,313
	S _U [m ²]	4,65	2,58

Tabla 3.7 – Análisis de las efectos de borde sobre la muestra opaca

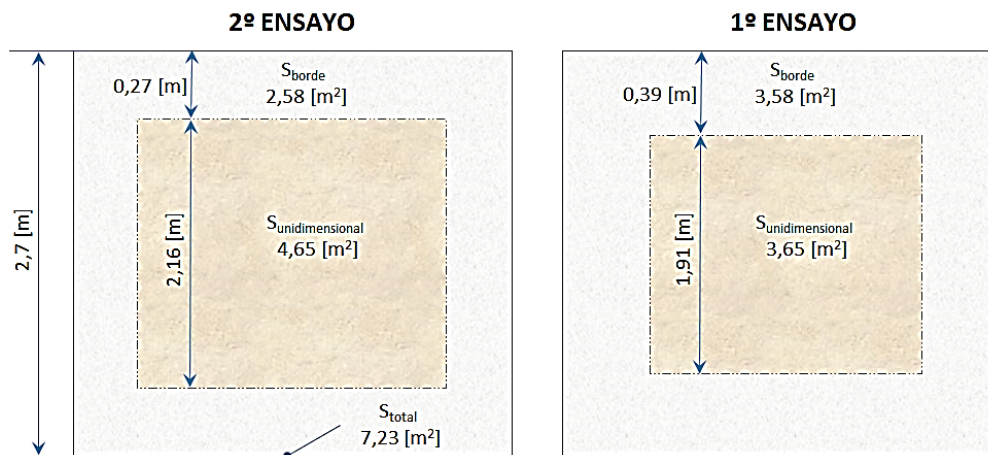


Figura 3.51 – Estimación de los efectos de borde en base a los resultados de transmitancias del modelo de muro opaco completo

Como la muestra es prácticamente simétrica, se puede aproximar esta superficie a un cuadrado con una longitud de lado de 2,16 [m]. Como las dimensiones de la muestra son de 2,7 [m], la zona afectada por los efectos de borde cubriría una banda perimetral de 0,27 [m] de anchura. Este valor es del orden de los resultados obtenidos en el análisis de la celda realizado en el *Capítulo 2*, en el *apartado 2.2.2*, y contrastados con los flujos medidos por las *multitiles* del muro de calibración, recogidos en el *apartado 3.3.2*. La superficie afectada por los efectos de borde es entonces de 2,58 [m²]. Por tanto, la conductancia por unidad de superficie estimada en esta zona, tomando el valor obtenido en la rama 2, es de $U_{borde} = 0,313$ [W/m²K]. Los datos se recogen en la Tabla 3.7, y en la Figura 3.51 se muestra una comparativa de las superficies por flujo en cada ensayo. Si se aplica este mismo análisis para los resultados obtenidos durante el primer ensayo, se obtiene que la superficie con flujo unidimensional estimada se reduce a 3,65 [m²]. Lo que correspondería con una profundidad del efecto de borde sobre la muestra de 0,39 [m]. Y el valor de conductancia por unidad de superficie para la zona de borde sería de $U_{borde} = 0,344$ [W/m²K]. Teniendo en cuenta que los efectos de borde son función de las características de los materiales y de la configuración geométrica, este aumento de la superficie afectada, al tratarse de la misma muestra y el mismo portamuestras, sólo puede deberse al cambio en la alineación de la probeta. El aumento en la conductancia por unidad de superficie de la zona de borde indica que en la configuración del primer ensayo se está produciendo un aumento del flujo real de calor intercambiado por el sistema de probeta-portamuestras respecto a la configuración del segundo ensayo. Como se muestra de forma gráfica en la Figura 3.52 esto se debe al perímetro de portamuestras, con anchura de 0,2 [m], que queda libre cuando la probeta se alinea con la cara exterior del anillo. El flujo de calor que se intercambia a través de esta superficie perimetral no se puede medir, ya que las *tiles* llegan hasta el borde de la sala de ensayos, y se está añadiendo al flujo que intercambia

la muestra, dando como resultado una estimación de la superficie de probeta afectada por los efectos de borde superior a la real. En base a los resultados obtenidos, la disposición de la muestra a ras de la cara interior del portaprobetas es la más adecuada para reducir los efectos de borde, siempre y cuando no se produzca sombreamiento debido al retranqueo.

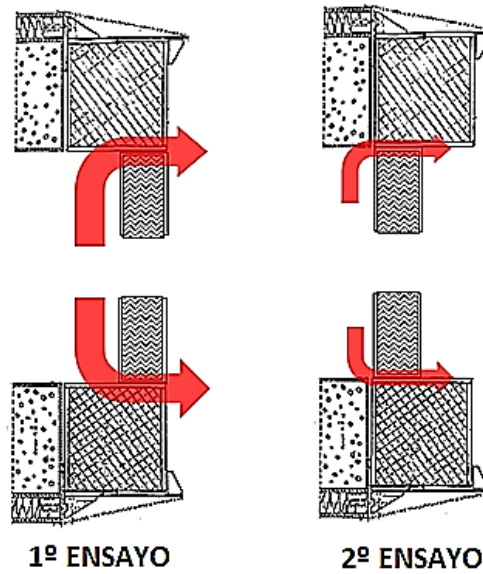


Figura 3.52 – Comportamiento efectos de borde para cada configuración de ensayo del muro opaco

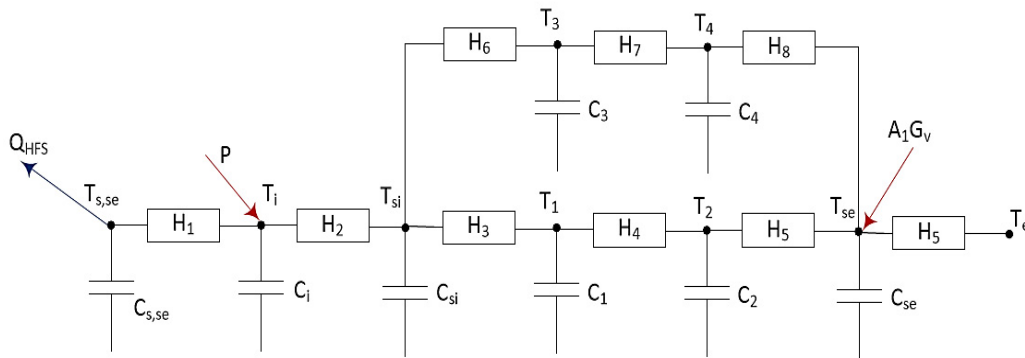


Figura 3.53 – Modelo completo del muro opaco con la interacción de la radiación solar y la convección exterior

	H_e [W/K]	h_e [W/m ² K]	A_{Gv} [m ²]	A_{Gv} [-]
1º ENSAYO	121.6	16.82	1.947	0.269
2º ENSAYO	101.1	13.98	2.042	0.282

Tabla 3.10 – Parámetros del intercambio de calor de la superficie del muro opaco con el ambiente exterior

Para evaluar este posible efecto se amplía el modelo del muro opaco al de la Figura 3.53 de forma que se pueda determinar la apertura solar. En la Figura 3.54 se muestran, como ejemplo, los resultados del ajuste del modelo para los datos correspondientes al segundo ensayo. En el caso del primer ensayo se obtienen resultados similares, ver Anexo B. En este caso, la temperatura superficial exterior, T_{se} , genera una perturbación en el ajuste de la temperatura de aire interior, T_i , pero se puede seguir considerando patrón de ruido blanco. Sin embargo, al igual que pasaba con los modelo del muro de

calibración en el capítulo anterior, los residuos de la T_{se} muestran claramente una periodicidad, como efecto de la radiación solar sobre el sensor, y el intercambio de onda larga, no considerado en el modelo. Aun así, como el residuo promedio es inferior a $0,4^{\circ}\text{C}$, el ajuste se puede considerar válido.

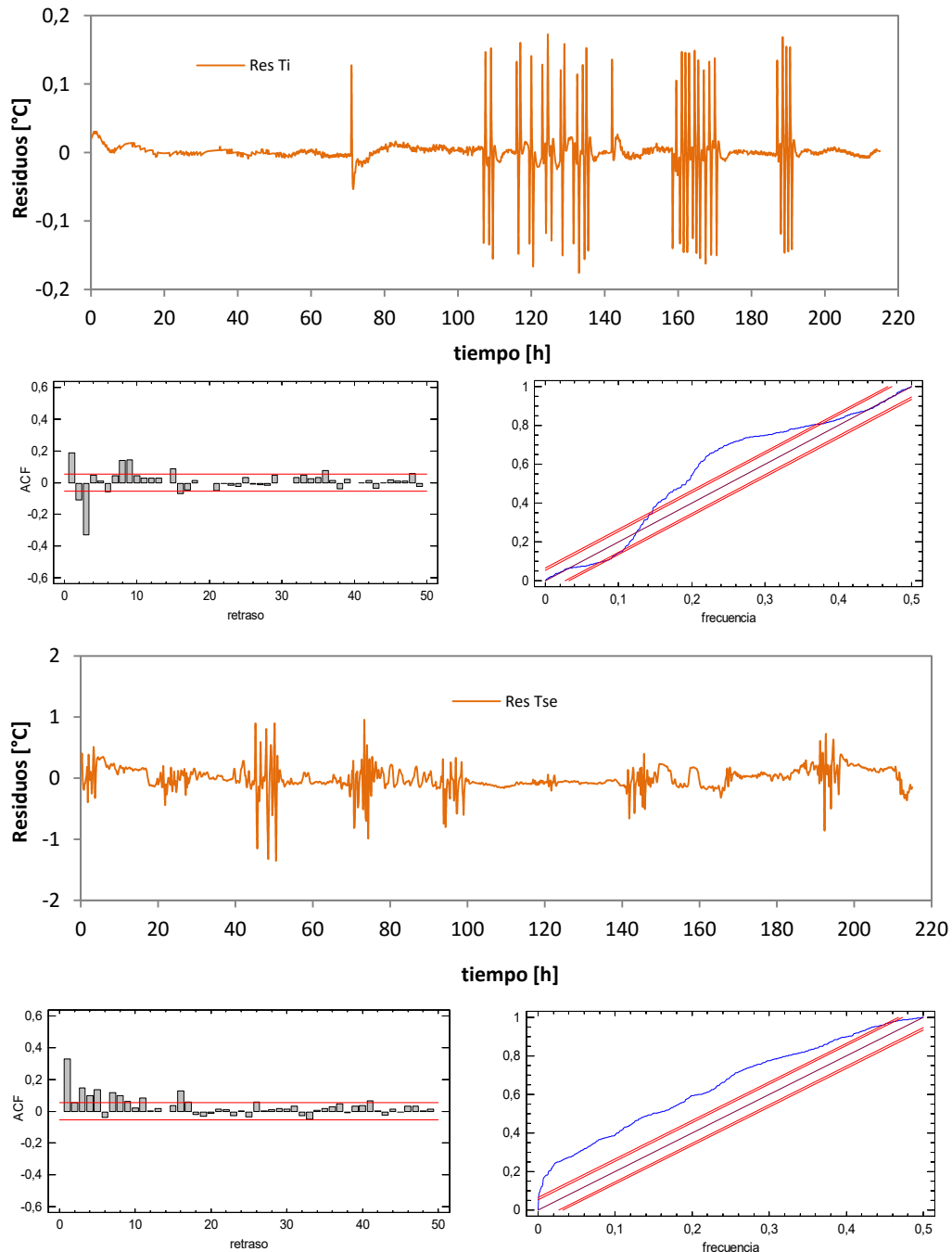


Figura 3.54 – Ajuste del modelo para la determinación de la ganancia solar en el segundo ensayo

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados del mismo para los parámetros de interés. El coeficiente de convección con el aire exterior, h_e , es del mismo orden, y conforme a las velocidades de aire que se han producido durante los ensayos. En cuanto al valor de la

apertura solar, A_{Gv} , el valor obtenido es equivalente para ambos ensayos. Por lo que, para los periodos ensayados, el retranqueo de la muestra no ha producido efecto alguno sobre la medida de la interacción de la muestra con la radiación solar incidente. Los resultados obtenidos durante el análisis de los dos ensayos realizados al muro opaco, permiten tomar una decisión en cuanto a la ubicación óptima de las muestras sobre el sistema portaprobetas. Esta ubicación óptima, teniendo en cuenta la minimización de los efectos de borde, y que no se producen sombreado representativos, es la de la muestra alineada con la cara interior. Este montaje se aplica en el resto de ensayos a realizar con la celda *EGUZKI*. A continuación se pasa a evaluar el ensayo de la segunda muestra del *IQ-Test*.

3.4.2 Modelo de la ventana

Una vez evaluado el muro opaco se puede realizar el análisis del segundo componente. En este caso el estudio de la transmitancia de la ventana obtenida en la celda *PASLINK*, se puede contrastar con los datos del ensayo normalizado. A continuación se define este ensayo en condiciones de laboratorio y posteriormente se tratan los datos experimentales del ensayo en *EGUZKI*.

3.4.2.1 Ensayo de transmitancia normalizado

Gracias a que el AT del LCCE dispone de un equipo de caja caliente guardada, antes de realizar los ensayos en la celda *EGUZKI*, se ha medido la transmitancia de la ventana cumpliendo la norma de ensayo *EN ISO 12567-1:2010*^[405]. El proceso de ensayo consiste en la colocación de la ventana sobre un bastidor formado por un perímetro de material aislante, en este caso de *EPS*, que presenta el hueco estándar de 1,25x1,50 [m] en su centro. El bastidor se coloca posteriormente en el equipo, separando dos cámaras climáticas, en las cuales se controla la temperatura y la velocidad de la cortina de aire que intercambia calor con la ventana. En la Figura 3.55 se muestra el montaje de la ventana del *IQ-Test* en el bastidor, y la disposición del mismo en el equipo de ensayo. También se muestra un esquema del procedimiento de ensayo. En la cámara fría se genera un flujo de aire que reproduce las condiciones ambientales exteriores, 0°C de temperatura y una velocidad de aire de 3 [m/s], lo que produce un coeficiente de convección de 25 [W/m²K]. En el lado caliente se dispone de una caja de medida aislada, que cubre la superficie de la ventana junto con una zona perimetral del bastidor aislado. Dentro de esta caja se dispone de ventiladores y resistencia calefactoras. Toda la energía introducida dentro de la misma, tanto la correspondiente a las resistencias eléctricas, como la potencia de los ventiladores, se mide con una incertidumbre inferior a ±0,2%. En el interior de la caja de medida se reproducen las condiciones del interior de las viviendas, temperatura de 20°C y velocidades bajas de aire, del orden de la convección natural, con un coeficiente de convección de $h_{conv} = 7,69$ [W/m²K]. El equipo está correctamente calibrado mediante un patrón de referencia que permite conocer el flujo de calor intercambiado por la zona del bastidor aislante, y el flujo de borde que se produce en la zona perimetral de la ventana. El ambiente de la cámara de medida esta atemperado por la cámara caliente que la guarda, origen del nombre del procedimiento de ensayo, y que regula su temperatura y velocidad de aire para que las pérdidas de calor a través de la superficie de la caja de medida sean nulas, y toda la energía introducida en la caja sólo pueda ser intercambiada a través de la muestra y su bastidor.

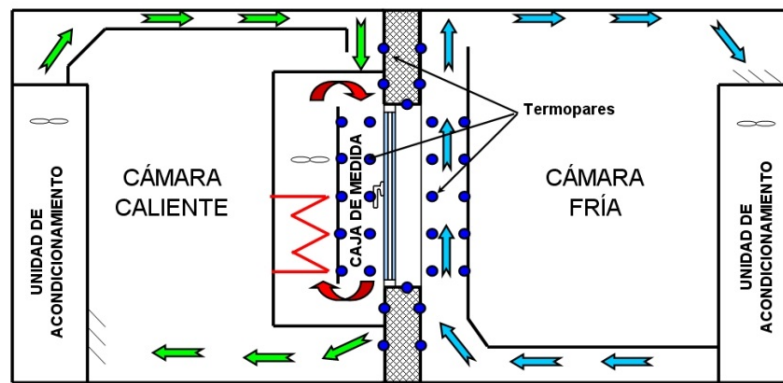


Figura 3.55 – Ensayo normalizado en caja caliente guardada de la ventana

El procedimiento de ensayo está definido de forma que se caracterizan todos los procesos de transmisión de calor entre los dos ambientes del equipo, intercambio convectivo, conducción a través de la muestra, e intercambio radiativo entre las superficies participantes, de forma que la incertidumbre de ensayo está acotada y es inferior al $\pm 5,6\%$. Para obtener una mayor fiabilidad en los resultados, el valor de ensayo se obtiene de la integración de los parámetros que participan del resultado en un intervalo de tiempo de 1000 [min]. Se consideran alcanzadas las condiciones de estacionario cuando las temperaturas de ambiente de ambas cámaras presenten una oscilación inferior a $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ y el flujo que atraviesa la ventana presente una desviación inferior al $\pm 1\%$. En la Figura 3.56 se muestra las temperaturas de la cámara fría y de la caja caliente, así como el flujo de calor que atraviesa la ventana. Se puede ver cómo, tras los primeros 200 [min] correspondientes al transitorio de inicialización del ensayo, las temperaturas permanecen constantes y el flujo se encuentra dentro de los límites requeridos por la norma de ensayo. Esta estabilidad se traduce en una medida estable del valor de transmitancia de la ventana, dentro de los límites de incertidumbre de la propia metodología de ensayo. En la Tabla 3.11 se recogen las condiciones del ensayo realizado a la ventana del IQ-Test y los principales valores de cálculo de la transmitancia. De forma que el valor final normalizado, con la resistencia superficial interior de $R_{c,i} = 0,13 \text{ [m}^2\text{K/W]}$ y exterior de $R_{c,e} = 0,04 \text{ [m}^2\text{K/W]}$, es de $U_v = 2,63 \pm 0,14 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. De cara al estudio interlaboratorio, además del conjunto de valores de transmitancia obtenidos en cada centro participante, el disponer de un valor medido según condiciones normalizadas permite tener una referencia importante a la hora de cuantificar la calidad del ensayo PASLINK.

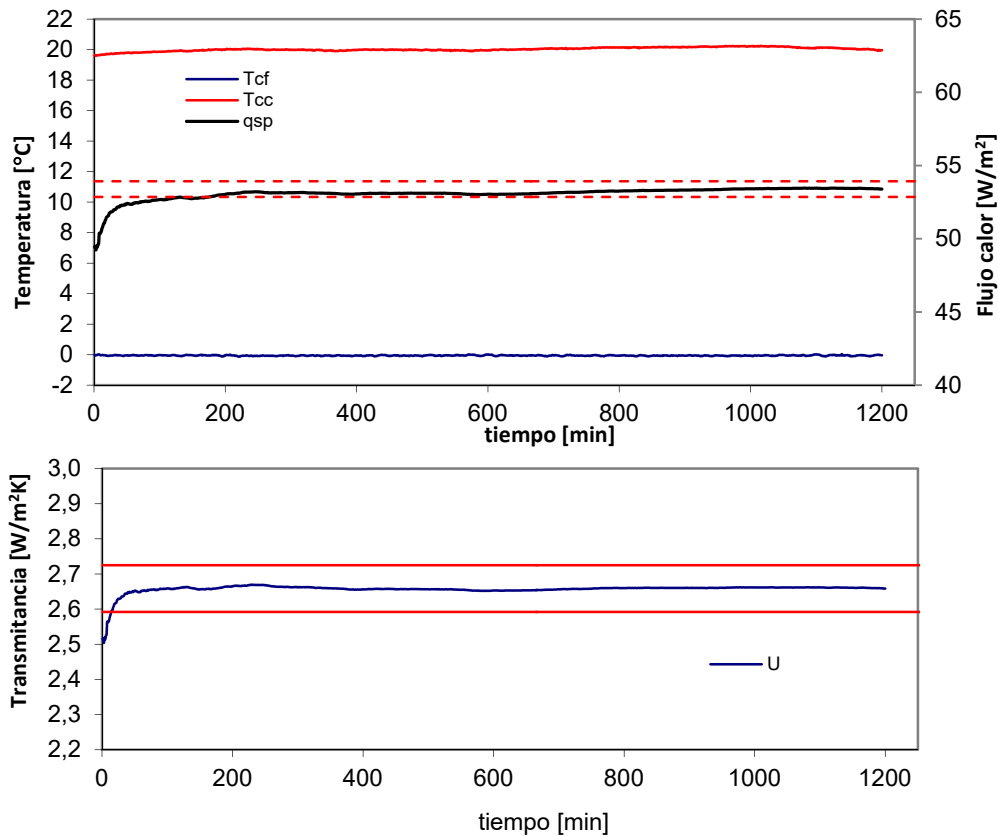


Figura 3.56 – Ensayo normalizado en caja caliente guardada de la ventana

Datos	Valor	Observaciones
$\theta_{me,sur}$ (temperatura media del panel circundante)	°C 9,8 ± 0,1	
R_{sur} (resistencia del panel circundante)	(m ² K)/W 5,961 ± 0,002	
Φ_{in} (potencia introducida)	W 96,63 ± 0,84	
Φ_{sur} (flujo de calor del panel circundante)	W 4,09 ± 0,02	
Φ_{edge} (flujo de calor en la zona extrema)	W 2,00 ± 0,01	
q_{sp} (densidad del flujo de calor de la probeta)	W/m ² 53,39 ± 0,46	
R_{st} (resistencia total de la superficie)	(m ² K)/W 0,166 ± 0,001	
$\theta_{n,i}$ (temperatura ambiente - caliente)	°C 20,03 ± 0,32	
$\theta_{n,e}$ (temperatura ambiente - fría)	°C -0,06 ± 0,08	
$\Delta\theta_c$ (diferencia de la temperatura ambiente)	°C 19,98 ± 0,22	
U_m (medido)	W/(m ² K) 2,658 ± 0,014	
ΔU_m (incertidumbre de la medición)	W/(m ² K) ± 0,133	
$R_{(s,t),st}$	(m ² K)/W 0,170	
U_{st}	W/(m ² K) 2,628 ± 0,133	

Tabla 3.11 – Condiciones del ensayo de caja caliente guardada de ventanas

Además, hay que tener en cuenta la complejidad del segundo componente del IQ-Test. La muestra es heterogénea, formada por una zona perimetral muy aislante, y una zona central muy conductora, de diferentes espesores y materiales. Sumado a esta

diferencia de comportamiento frente al mecanismo de transmisión de calor por conducción, hay que considerar la transmisión de radiación solar por la parte traslúcida de la ventana. En este caso, junto a la dispersión de resultados de ensayo, debido a las pequeñas diferencias de las características de cada una de las probetas construidas en cada laboratorio, hay que sumar el empleo de diferentes modelos de representación del componente. Por tanto, el análisis de los resultados del segundo componente permitirá evaluar de forma completa la trazabilidad de la metodología de ensayo PASLINK, cubriendo todos los aspectos que participan en el proceso.

3.4.2.2 Ensayo de transmitancia en condiciones exteriores

El modelo más empleado en los diferentes centros de ensayo para el proceso de identificación de parámetros es el representado en la Figura 3.57. Se trata del modelo más simple posible que tiene en cuenta las características de la muestra definidas anteriormente. Las dos ramas de conductancias reproducen el comportamiento aislante del perímetro, junto con su inercia térmica, y la transmitancia directa de la ventana, sin capacidades térmicas. Y también se contempla la ganancia solar en el aire interior de la sala de ensayos.

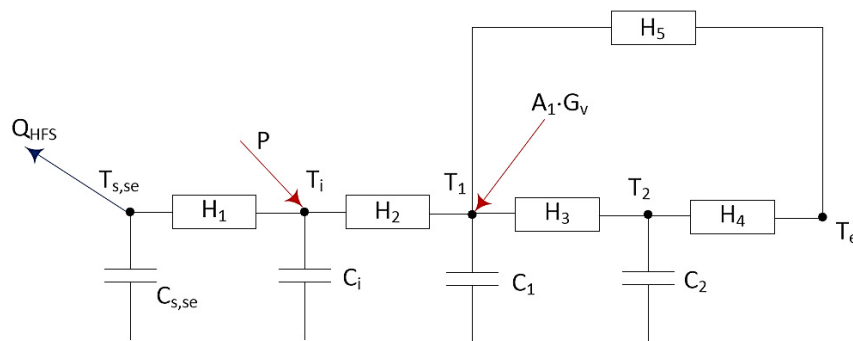


Figura 3.57 – Modelo simple de la segunda muestra del IQ-Test

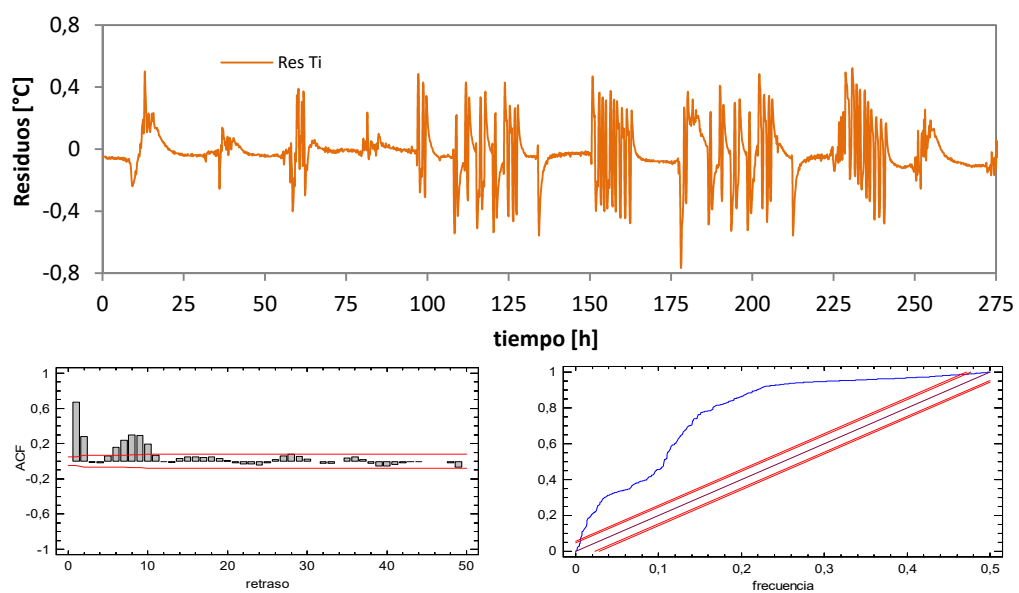


Figura 3.58 – Estudio de residuos del modelo simple para la muestra con ventana

Debido a la cortina negra que se coloca por el interior de la muestra, para eliminar la radiación directa sobre las *tiles*, la ganancia solar se asocia a un nodo de temperatura interior, T_i , diferente a la temperatura media del ambiente de la sala de ensayos, T_i . Este nodo es necesario, ya que tanto la temperatura de esta capa de aire, como el coeficiente de convección superficial serán diferentes a los propios del ambiente de la sala de ensayos. Si se analizan los residuos de la Figura 3.58, en la que se muestran los resultados para el ajuste del segundo ensayo de la ventana, el análisis completo de todos los resultados se puede ver con más detalle en el Anexo B. Se puede comprobar que el modelo no reproduce de forma completa el proceso de transmisión de calor, ya que los residuos no muestran un ajuste al patrón de ruido blanco.

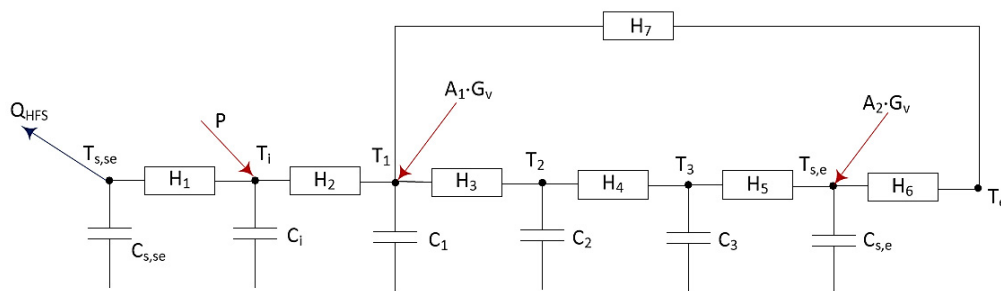


Figura 3.59 – Modelo ampliado de la segunda muestra del IQ-Test

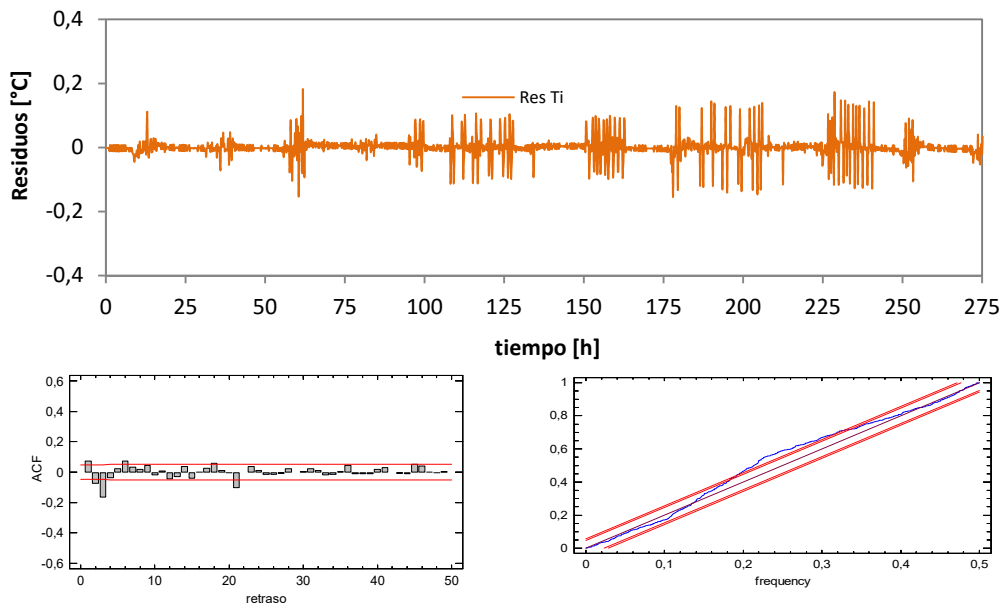


Figura 3.60 – Estudio de residuos del modelo ampliado para la muestra con ventana

Si se incluye en el modelo la interacción con el ambiente exterior, tanto el proceso de convección, como la radiación solar incidente sobre la superficie, y se amplía el orden del modelo para la rama que representa la transmisión de calor del perímetro aislante, ver Figura 3.59, se obtiene una mejora considerable en el ajuste del modelo, ver Figura 3.60. Se han aplicado estas modificaciones ya que es la parte opaca la que presenta mayor simplificación en el modelo inicial. En cambio, el proceso de transmisión de calor a través de la ventana es más sencillo, sin inercias mensurables, y como en la determinación de la transmitancia de una ventana se consideran las resistencias superficiales incluídas, la representación se puede simplificar adecuadamente con una única conductancia. En la Tabla 3.12 se muestran los

resultados obtenidos con el modelo, y la transmitancia final calculada para la ventana para los dos ensayos realizados. Como en el caso del muro opaco, debido a la mejores condiciones obtenidas en el segundo ensayo, las incertidumbres de cálculo son mejores, y por tanto, se emplearán estos valores como los correspondientes al ensayo interlaboratorio.

	Muro Completo			Ventana			
	Opaco + Ventana			U [W/m ² K]	e _U [W/m ² K]	g [-]	e _g [-]
	UA [W/K]	UA [W/K]	gA [m ²]	U [W/m ² K]	e _U [W/m ² K]	g [-]	e _g [-]
1º ENSAYO	6,95	5,43	1,06	2,89	0,22	0,57	0,06
2º ENSAYO	6,48	5,22	1,01	2,78	0,18	0,54	0,05

Tabla 3.12 – Resultados de los dos ensayos del segundo componente del IQ-Test

Una vez realizados los ensayos completos del procedimiento *IQ-Test*, tanto para el muro opaco, como para el componente de la ventana, y acotadas las incertidumbres de los parámetros de medida recogidos en la metodología del interlaboratorio, queda introducir éstos en el conjunto de resultados obtenidos por el resto de componentes que participaron en el mismo.

3.5 Resultados del ensayo de trazabilidad

La comparativa global de resultados permite obtener, por un lado, la fiabilidad del procedimiento de ensayo en sí mismo, y por otro, la calidad de trabajo del conjunto de participantes a nivel individual. En este apartado se realiza dicho análisis global, aplicando los estadísticos estándar de los estudios interlaboratorio, y se realiza una valoración global de la calidad del ensayo interlaboratorio y del comportamiento de la celda *EGUZKI*, en particular.

3.5.1 Análisis estadístico

Como ya se ha comentado, la definición del ensayo interlaboratorio *IQ-Test* se ha realizado de forma que la complejidad de los ensayos y resultados a determinar fuera creciente, y así, poder ir obteniendo conclusiones parciales que permitan ir depurando resultados anómalos. El primer paso consiste en verificar el comportamiento del procedimiento para una probeta, que en sí misma, introduzca la mínima dispersión de resultados, como es el caso del muro opaco. En la Tabla 3.3 se recogen los resultados obtenidos para el conjunto de participantes, en sombreado se destacan los resultados correspondientes a la celda *EGUZKI*, realizados en el AT del *LCCE*. Para verificar que la muestra construida en cada centro presenta las mismas propiedades, se analiza la transmitancia obtenida para el perfil central. De este estudio también se obtiene una primera evaluación en el uso de las herramientas de identificación de parámetros, aunque sean aplicadas a un modelo sencillo. El valor medio del conjunto de resultados es de $U_{central} = 0,17$ [W/m²K], con una desviación de $s_U = 0,02$ [W/m²K]. En la Figura 3.61 se muestra cada resultado respecto a este valor medio, junto con la banda de incertidumbre correspondiente a la varianza de los resultados. Como se puede observar, todos los centros participantes se encuentran próximos a la media y dentro de la banda del 95% de fiabilidad.

	Muro Completo	$e \pm$	Área muestra	Muro Completo	$e \pm$	Perfil Central	$e \pm$
	UA [W/K]	[W/K]	[m ²]	U [W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
BBRI	1,28	0,10	6,25	0,20	0,02	0,17	0,01
BRE	1,37	0,19	7,16	0,19	0,03	0,18	0,02
CIEMAT	2,02	0,17	6,13	0,33	0,03	0,17	0,01
CRES	1,59	0,02	7,63	0,21	0,00	0,18	0,01
EMPA	1,06	0,10	6,73	0,16	0,01	0,16	0,01
FGUP	1,12	0,02	6,10	0,18	0,00	0,17	0,01
JRC	4,40	0,34	7,45	0,59	0,05	0,18	0,01
TNO	2,06	0,16	7,58	0,27	0,02	0,19	0,01
UoB Cottbus	1,40	0,10	7,43	0,19	0,01	0,18	0,01
VTT	1,25	0,14	7,32	0,17	0,02	0,17	0,01
AT-LCCE	1,57	0,05	7,23	0,22	0,01	0,16	0,01

Tabla 3.13 – Resultados del primer componente del IQ-Test

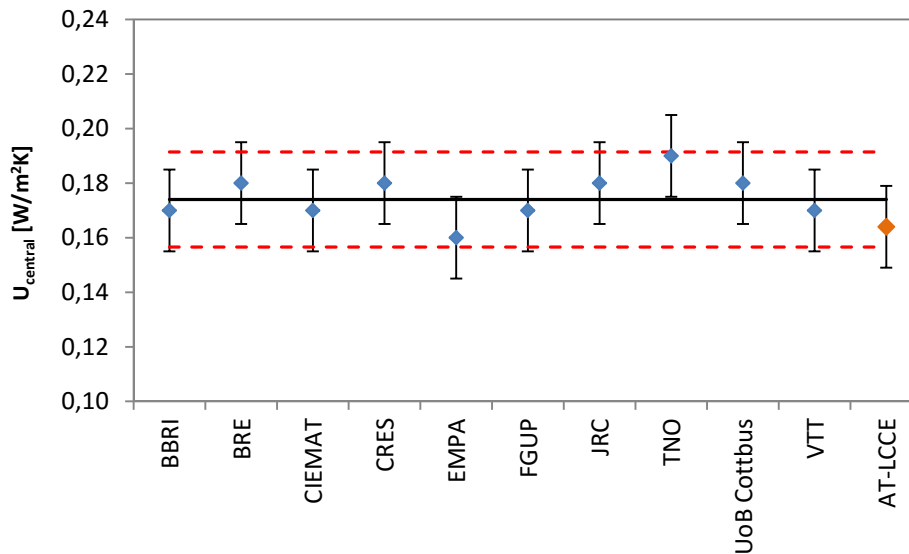


Figura 3.61 – Análisis resultados de la transmitancia del perfil central del muro opaco

Para cuantificar la consistencia de los resultados procedentes del conjunto de laboratorios se emplea el estadístico h de Mandel, según indica la norma ISO 5725^[23]. Este estadístico permite comparar el resultado de cada laboratorio particular con el valor promedio del conjunto de laboratorios y se define según la expresión [3.9]. En dicha expresión el numerador cuantifica la desviación de cada laboratorio, x_i , respecto al promedio del global, y el denominador cuantifica la desviación típica del conjunto de valores.

$$h = \frac{(x_i - m)}{s_x} \quad [3.9]$$

El valor crítico de $h_{crítico}$ se determina mediante la expresión [3.10], donde p es el número de laboratorios participantes y t es el valor de t de Student a dos colas con $p-2$ grados de libertad y el nivel de significación considerado.

$$h_{crítico} = \frac{(p - 1) \cdot t}{\sqrt{p \cdot (t^2 + p - 2)}} \quad [3.10]$$

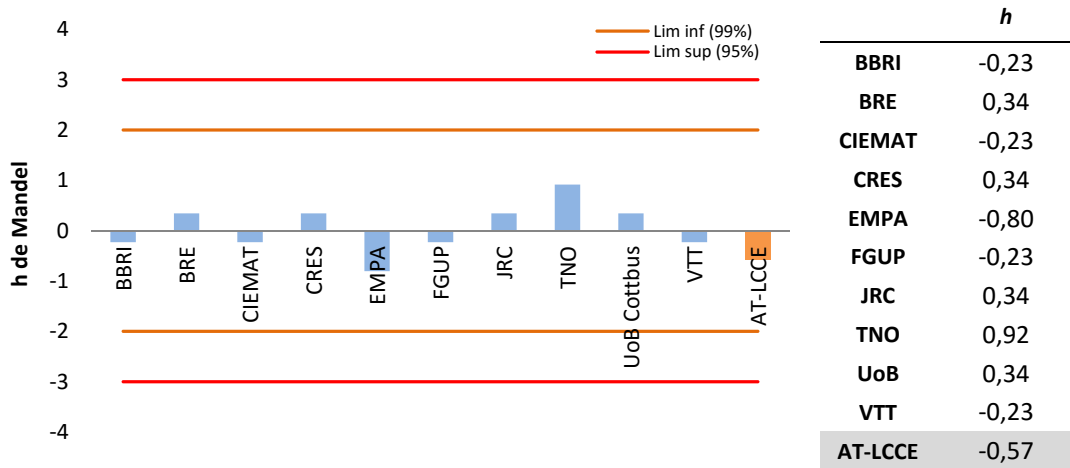


Figura 3.62 – Estudio estadístico de la medida del perfil central del muro opaco

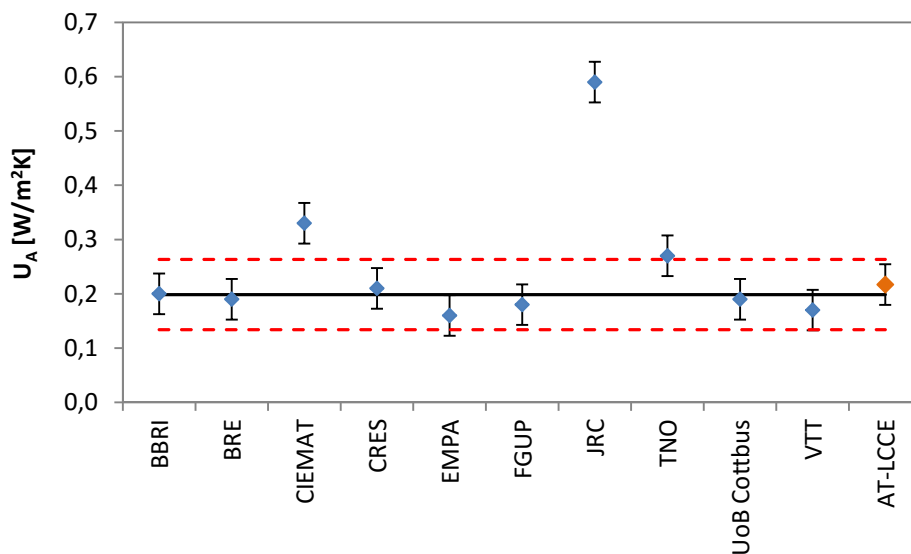


Figura 3.63 – Análisis de los resultados de la transmitancia total del muro opaco

Usualmente, en los estudios de interlaboratorio se suele aplicar el criterio siguiente: $|h| < 2$ satisfactorio (fiabilidad del 99%), $2 < |h| < 3$ cuestionable y $|h| > 3$ insatisfactorio (fiabilidad del 95%). Para el caso particular del IQ-Test se dispone de 11 participantes de forma que el valor crítico con un nivel de significancia de $\alpha = 0,01$ es de $h_{crítico} = 2,065$, por lo que se alcanzan los patrones estándar de los criterios de evaluación. En la Figura 3.62 se recogen los resultados del análisis de los valores obtenidos para la medida de la transmitancia del perfil central. Todos los centros están en condiciones satisfactorias. En base a los resultados obtenidos, se puede considerar que la muestra del muro opaco presenta unas características homogéneas para la realización del

estudio interlaboratorio. Ahora queda por evaluar la reproducibilidad de las condiciones de ensayo asociadas a las características propias de cada celda. Para ello se evalúa la transmitancia total de la muestra. Este valor engloba los efectos de borde del portamuestras, y el conjunto de mecanismos de transmisión de calor que no se determinan en el estudio, como las infiltraciones de aire, por ejemplo. En la Figura 3.63 se muestra de forma gráfica los resultados de estos valores. Destaca el resultado obtenido en el JRC, cuyo valor difiere en gran medida del resto. Esta divergencia se debe a que la celda de ensayos de este centro corresponde al primer prototipo de celda, en la que se han aplicado una serie de mejoras consecutivas de cara a definir las configuraciones finales. Por tanto, debido a las condiciones particulares de esta celda, se puede extraer del conjunto del estudio. De esta forma se obtiene un valor medio de $U_A = 0,20$ [W/m²K] con una desviación de $s_{U_A} = 0,06$ [W/m²K]. Esto implica que el valor promedio del conjunto de efectos de borde y pérdidas de calor no identificadas es del 14,1%. Y como se puede apreciar, estas características son homogéneas para el conjunto de celdas de ensayo.

	Muro Completo Opaco + Ventana	Ventana	Ventana	Ventana	$e \pm$	Ventana	$e \pm$
	U_A [W/K]	U_A [W/K]	g_A [m ²]	U [W/m ² K]	[W/m ² K]	g [-]	[-]
BBRI	4,70	3,75	0,97	2,00	0,16	0,52	0,08
BRE	5,74	4,74	1,12	2,53	0,20	0,60	0,08
CIEMAT	6,89	5,20	1,07	2,77	0,11	0,57	0,02
CRES	5,94	4,74	0,96	2,53	0,19	0,51	0,03
EMPA	5,59	4,84	0,98	2,58	0,29	0,53	0,01
FGUP	5,28	4,50	0,67	2,40	0,06	0,36	0,01
JRC	8,65	4,55	0,97	2,43	0,16	0,52	0,04
TNO	7,21	5,51	1,17	2,94	0,20	0,62	0,04
UoB Cottbus	5,51	4,43	1,02	2,36	0,14	0,54	0,02
VTT	5,19	4,26	1,06	2,27	0,15	0,57	0,04
AT-LCCE	6,48	5,22	1,01	2,78	0,18	0,54	0,05

Tabla 3.84 – Resultados del segundo componente del IQ-Test

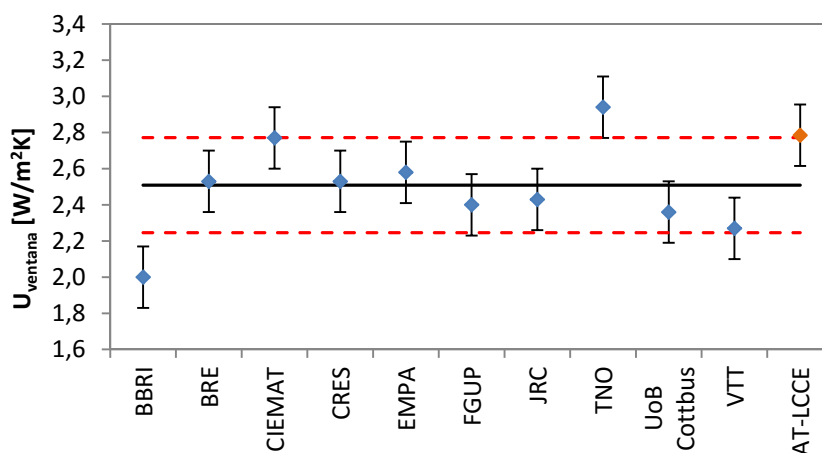


Figura 3.64 – Análisis de los resultados de la transmitancia de la ventana

Una vez evaluado el primer ensayo del *IQ-Test* cabe concluir que el comportamiento de cada centro es válido y se dispone de una caracterización adecuada del muro opaco, tanto en su perfil central como en su conjunto, de forma que se dispone de unos datos base adecuados para el estudio siguiente de la segunda muestra, cuyos resultados se recogen en la Tabla 3.84. Comenzando con el análisis de la transmitancia de la ventana, en la Figura 3.64 se muestra el comportamiento del conjunto de valores. La media obtenido es de $U_v = 2,51$ [W/m²K] con una desviación de $s_{U_v} = 0,26$ [W/m²K]. Aunque, en conjunto, el resultado parece aceptable ya que prácticamente el total de centros se encuentra dentro de la banda de confianza, la dispersión de resultados es muy alta. Si se analizan los valores puntuales, se pasa desde un valor mínimo de $U_{v,min} = 2,00$ [W/m²K], hasta un valor máximo casi una unidad superior, $U_{v,max} = 2,94$ [W/m²K], lo que representa un intervalo de variación del 37,5% respecto al valor medio. Esta gran dispersión no permite aplicar los criterios de valoración del estadístico *h*. Antes es necesario analizar las causas de esta elevada dispersión entre los resultados de los diferentes centros y tenerlas en cuenta para considerarlas en el análisis de interlaboratorio. Si se estudia el proceso de transmisión de calor a través de la muestra de ventana, a diferencia de la probeta del muro opaco, las condiciones de ensayo tienen un peso muy importante en el valor de transmitancia del componente. La U_v está afectada tanto por la resistencia térmica propia de la ventana como por los coeficientes de convección superficiales, interior y exterior, ecuación [3.11].

$$\frac{1}{U_v} = R_{ci} + R_v + R_{ce} \quad [3.11]$$

Las resistencias superficiales son función directa de la velocidad de aire sobre las dos superficies. La convección interior no se tiene en cuenta como componente de la dispersión de resultados, ya que, en principio, el ambiente interior de la sala de ensayos presenta unas condiciones homogéneas entre equipos de ensayo, según la definición de la celda y de los requisitos del procedimiento estándar de ensayo. En cambio, la convección exterior sí que presenta un efecto representativo. Para determinar la resistencia superficial exterior se emplean modelos de la forma indicada en las ecuaciones [3.12].

$$R_{ce} = \frac{1}{h_{ce}} \quad \begin{array}{l} v_{aire} \leq 5[m/s] \rightarrow h_{ce} = a + b \cdot v_{aire} \\ v_{aire} \geq 5[m/s] \rightarrow h_{ce} = a \cdot v_{aire}^b \end{array} \quad [3.12]$$

En cuanto a la resistencia térmica propia de la ventana, la variabilidad de resultados sería función principalmente de la resistencia asociada a la cámara de aire entre los vidrios, que se ve afectada por el intercambio radiativo y por el movimiento de convección del aire, ver ecuación [3.13]. El coeficiente de intercambio de calor por radiación, h_r , se suele aproximar mediante la expresión [3.14]; para el rango de trabajo en la edificación el error que se comete con esta aproximación es inferior al 0,2%.

$$\Delta R_v = f(R_{ca}) \rightarrow R_{ca} = \frac{1}{h_r + h_c} \quad [3.13]$$

$$h_r = \frac{4\sigma T_m^3}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \quad [3.14]$$

Y el coeficiente de intercambio por convección, h_c , se obtiene de la aplicación del número de Nusselt, que a su vez es función del número de Rayleigh, ver ecuaciones [3.15].

$$h_c = Nu \frac{\lambda}{s} \quad [3.15]$$

$$Nu = A \cdot (Ra)^n \rightarrow Ra = \frac{g e^3 \Delta T}{\nu^2 T_m}$$

Tras evaluar los factores que participan en la transmitancia de la ventana se obtiene que es función de la temperatura media del aire dentro de la cámara, del salto de temperaturas entre los vidrios y de la velocidad del aire exterior, fundamentalmente.

$$U_v = f(T_m, \Delta T, v_{ext}) \quad [3.16]$$

Si se analizan los rangos de estas variables para cada centro de ensayo se comprueba que pueden describir perfectamente la variabilidad de resultados obtenidos. Comenzando por la velocidad de aire exterior, los valores medios que se dan durante el ensayo de la ventana van desde 0,3 [m/s] hasta 4,3 [m/s]; este rango pueden generar una variación en la transmitancia de hasta $\Delta U_v = 0,4$ [W/m²K].

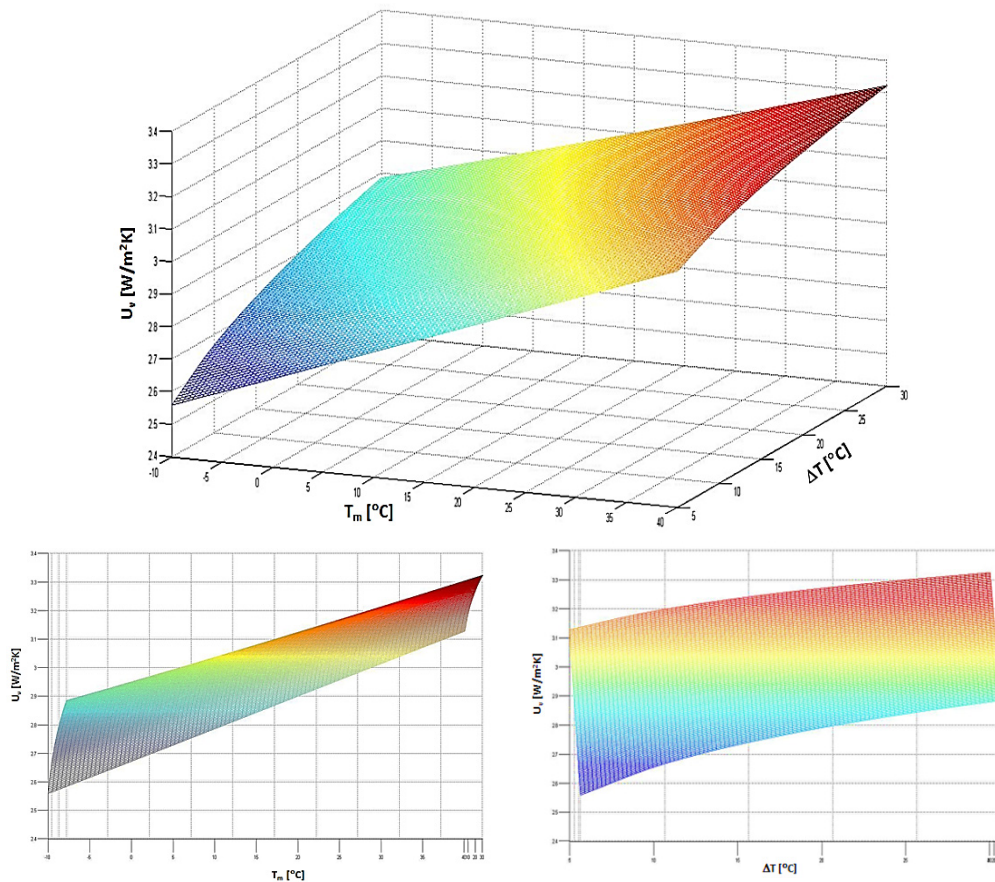
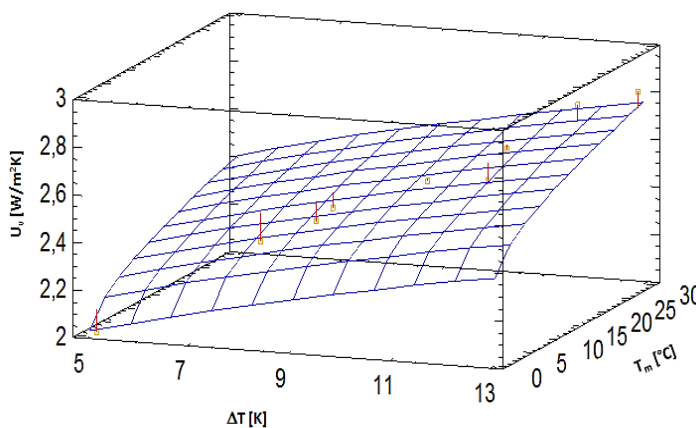


Figura 3.65 – Estimación de la variación de la transmitancia de la ventana, U_v , en función de la temperatura media de la cámara de aire, T_m , y del salto de temperaturas entre vidrios, T .

Como se puede ver del estudio realizado, las diferentes condiciones de ensayo explican la variabilidad de resultados obtenidos en los valores de transmitancia de la ventana, como muestran cada una de las proyecciones de la superficie respecto a los ejes T_m y T . Por tanto, para poder aplicar el análisis estadístico al interlaboratorio es necesario contemplar los parámetros que afectan a la transmitancia. Es decir, ya no se puede emplear el modelo simple empleado para el muro opaco, en el que se compara cada resultado con la media más un error. Para el caso de la ventana, cada componente se debe comparar el valor estimado por la función que contempla los efectos de las variables de ensayo más el término de error, ver ecuación [3.17]. En este caso, la función que relaciona la transmitancia de la ventana con las temperaturas y con la velocidad exterior de aire, $U_v = f(T_m, \Delta T, v_{ext})$, es no lineal y su definición de forma explícita es compleja. Una función simple que permite reproducir el efecto de las tres variables, con el mínimo número de coeficientes de ajuste es la definida en la ecuación [3.18].

$$\begin{aligned} \text{Muro opaco} \quad & y = m + e \\ \text{Ventana} \quad & y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + e \end{aligned} \quad [3.17]$$

$$U_v = A_1 + A_2 \Delta T^{A_3} + A_4 T_m^{A_5} + A_6 v_{ext}^{A_7} \quad [3.18]$$



Parámetro	Estimación
A1	1,0454
A2	0,253606
A3	0,498781
A4	0,0566495
A5	0,57055
A6	0,270804
A7	0,40672

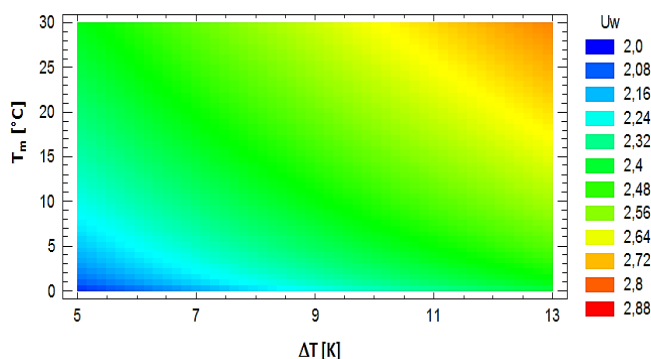


Figura 3.66 – Función de ajuste de la transmitancia de la ventana, U_v , con $v_{ext} = 2,3$ [m/s]

Donde el conjunto de coeficientes de la función, A_i , se determinan mediante regresión, aplicando un procedimiento iterativo. En la Figura 3.66 se muestra el resultado obtenido. La bondad de ajuste es de $R^2 = 95,5\%$, y los residuos obtenidos por el modelo

respecto a los valores medidos no presentan correlación, por lo que se considera adecuada la función. Como se puede ver al comparar la Figura 3.65 y la Figura 3.66, la superficie de ajuste obtenida se comporta como la respuesta estimada para el proceso de convección esperado en una cámara cerrada respecto a las correlaciones estándar. La superficie de ajuste que se muestra se ha calculado tomando como velocidad de aire exterior el valor medio de los datos de ensayo, $v_{ext} = 2,3$ [m/s], al igual que en el modelo teórico.

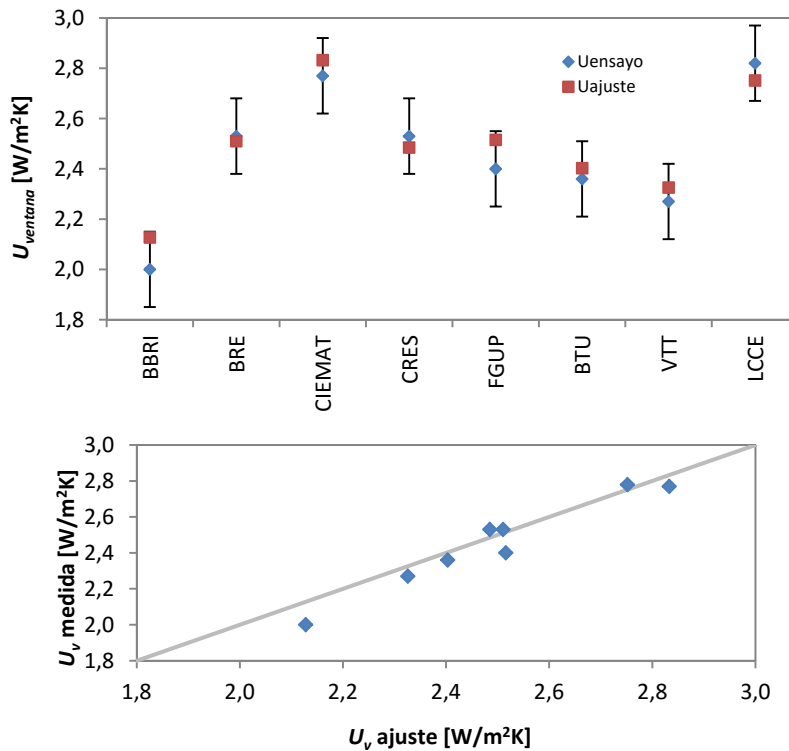


Figura 3.67 – Comparativa entre los valores experimentales y los valores de ajuste

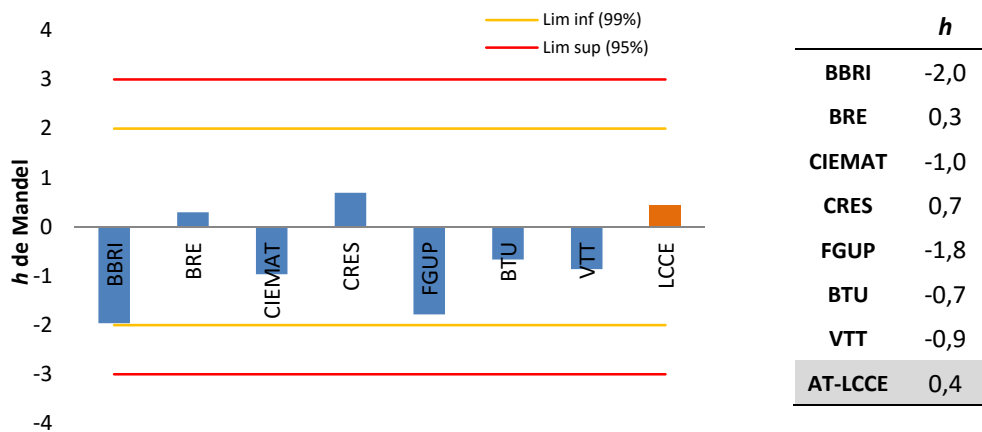


Figura 3.68 – Estudio estadístico de la medida de la transmitancia de la ventana

En la Figura 3.67 se muestra la comparativa directa entre los valores medidos y los valores obtenidos a través de la función de ajuste. En todos los casos el residuo es inferior al error medio del ensayo, y los valores ajustados concuerdan con los valores medidos. Otro contraste de validez del ajuste es la comparación con el valor de ensayo normalizado que se ha realizado en el equipo de caja caliente. El valor predicho por el

ajuste es de $U_v = 2,64$ [W/m²K], lo que implica una desviación de solo $\Delta_{U_v} = 0,01$ [W/m²K]. Una vez contemplados los efectos de las variables que afectan a la medida de la transmitancia de la ventana, se puede aplicar el proceso de análisis interlaboratorio. En este caso el estadístico h de Mandel se realiza sobre los residuos obtenidos entre la función de ajuste y los valores medidos por cada centro. En la Figura 3. se recogen los resultados. Todos los centros se encuentran dentro del rango de fiabilidad del 95%.

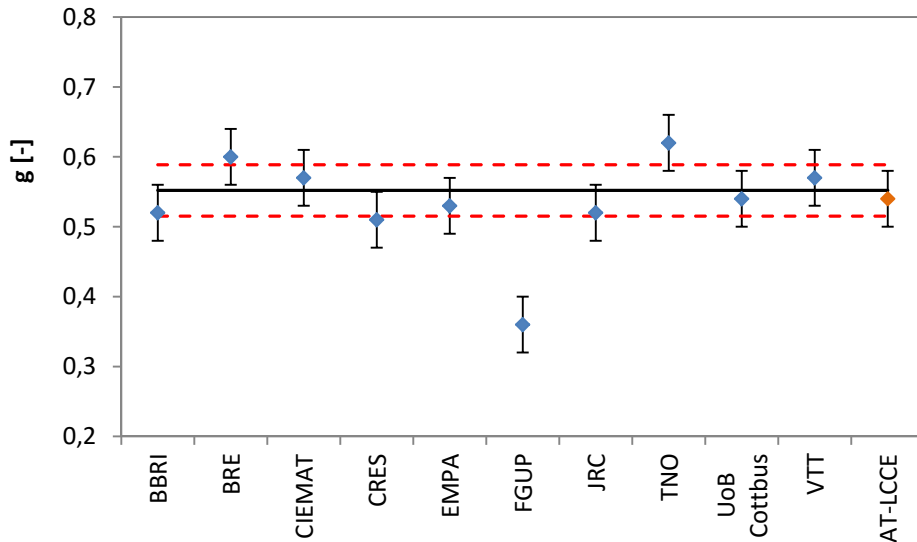


Figura 3.69 – Análisis de los resultados del factor solar

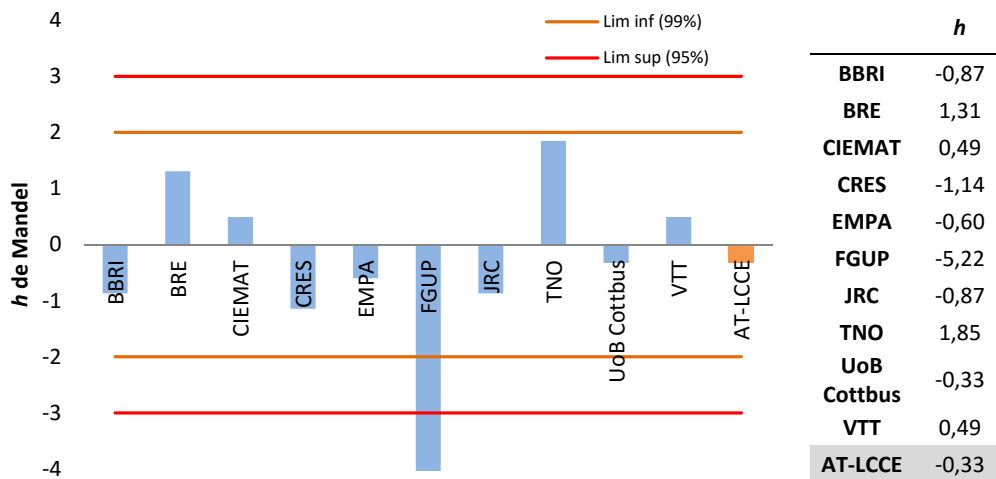


Figura 3.70 – Estudio estadístico de la medida del factor solar

Por último, queda evaluar la medida del factor solar. En la Figura 3.69 se muestra el comportamiento de cada centro respecto a la media y la banda del 95% de fiabilidad. Los valores, o su intervalo de error, se encuentran dentro del rango de validez, salvo un valor puntual que está muy alejado. Este valor se ha retirado del cálculo, y como se verificó posteriormente, la desviación se debe a un problema en la medida de la radiación solar durante el ensayo^[27]. El valor medio obtenido en el conjunto de ensayos es de $g = 0,55$, con un intervalo que va desde el valor máximo de $g_{max} = 0,62$ hasta un valor mínimo de $g_{min} = 0,52$, lo que representa una variación del 18,1% respecto al valor medio. La desviación estándar de $s_g = 0,04$, lo que representa un 6,7%, y cuya magnitud

es del mismo orden que el error medio, $e_g = 0,04$, por lo que se trata de un conjunto de resultados muy homogéneo. En cuanto al resultado del interlaboratorio, ver Figura 3.70, todos los centros se encuentran dentro del rango de condiciones satisfactorias.

3.5.2 Valoración final

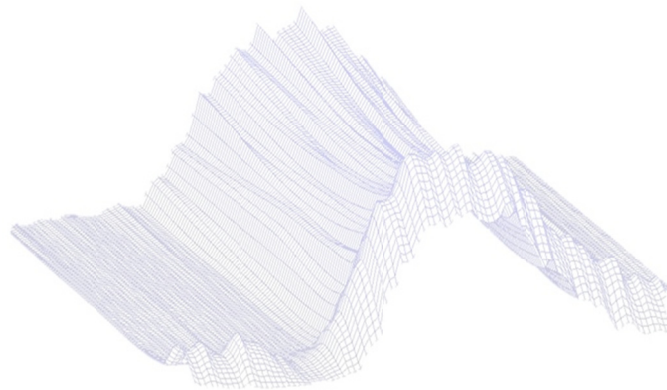
Una vez finalizado el análisis de los resultados del *IQ-Test* cabe realizar una valoración final en relación a la precisión del comportamiento de la metodología de ensayos y de la respuesta de la celda *EGUZKI*, en particular. Dicha valoración es la siguiente:

- El diseño y definición adecuados de la celda de ensayo permite disponer de un equipo que presenta unas características de trazabilidad adecuadas para la realización de ensayos en condiciones exteriores. Los efectos de borde, tamaño de las muestras, componentes no cuantificados, etc..., presentan unos valores homogéneos entre centros. Por lo que, la celda *PASLINK* demuestra ser un equipo idóneo para realizar ensayos de soluciones constructivas, manteniendo los estándares de calidad de ensayos normalizados.
- Las muestras empleadas para el ensayo interlaboratorio, aún con la problemática que conlleva el tamaño de las mismas, han mostrado unas propiedades adecuadas para el análisis de la calidad del ensayo, asegurando que las propiedades de cada componente de estudio eran comparables.
- Gracias a los procedimientos que definen la precisión y calibración de los instrumentos se obtiene una alta calidad en los datos experimentales, y equivalente entre los distintos centros de ensayo. Así mismo, los modelos de representación de las muestras son simples y adecuados. Incluso en los modelos de la ventana, que presenta una mayor complejidad.
- Los procedimientos de ensayos han demostrado una gran potencialidad. Gracias a su configuración se maximiza la información de los datos que se obtienen, minimizando la duración de los mismos.
- La metodología ha demostrado una alta precisión de medida de las propiedades básicas de estudio de los componentes ensayados, como son la transmitancia y el factor solar.

El ensayo de trazabilidad ha permitido cuantificar la precisión y trazabilidad de la metodología *PASLINK*, de ahí la razón por la que se ha elegido este equipo como sistema de medida. Por otro lado, la puesta a punto de la celda *EGUZKI* ha sido correcta, y los resultados están dentro del conjunto de la red de centros, lo que asegura la trazabilidad de los resultados de ensayo. También se ha demostrado la experiencia adquirida en el modelado de las muestras y en la aplicación de las técnicas de identificación de parámetros. Por tanto, una vez asegurada la fiabilidad y calidad de la metodología de ensayo se pasa al desarrollo de la fase experimental de caracterización de fachadas ventiladas.

Capítulo 4

Caracterización experimental de fachadas





4.1 Construcción e instrumentación de las muestras

Hay una gran variedad de fachadas ventiladas. En este caso interesa caracterizar el comportamiento de fachadas opacas con cortina de aire exterior. Gracias a sus propiedades constructivas esta tipología tiene una aplicación muy extendida en el sector de la vivienda, tanto para construcción nueva como para rehabilitación. Estas fachadas están formadas por un muro base, una capa de aislamiento, una cámara de aire ventilada, y una hoja exterior que actúa como cierre final. Esta configuración tiene una serie de ventajas constructivas interesantes. Por un lado, la ejecución del muro base se simplifica, ya que no es el cierre final externo y su ejecución no exige un acabado muy fino y por tanto se reduce el tiempo de construcción. Además, la disposición del aislante sobre el muro base permite que la capa de aislamiento sea continua, reduciendo los efectos de puentes térmicos en los frentes de pilares y forjados, y en las zonas de encuentro entre fachadas. En cuanto a la cámara ventilada, su espesor puede ser variable, pasando desde los 2-3 [cm] hasta espesores de 10-15 [cm], según las necesidades. Además, el movimiento de aire dentro de la cámara aporta un comportamiento higroscópico muy bueno a la fachada. En cuanto a la hoja exterior, tiene una gran versatilidad constructiva, permitiendo emplear una variedad muy amplia de materiales: pétreos, cerámicos, metálicos ..., lo que permite disponer de una gran capacidad de diseño arquitectónico.

El conjunto de variables que aportan las fachadas ventiladas las hace muy versátiles y de ahí su gran potencialidad constructiva y el auge en su aplicación en la actualidad. Pero, ese mismo conjunto de variables, hace que su comportamiento energético sea más complejo de caracterizar, y actualmente no se dispone de suficientes datos experimentales trazables sobre el comportamiento térmico de este tipo de fachadas. Las velocidades de aire y el proceso de convección dentro de la cámara ventilada o la interacción con la radiación solar de la hoja exterior, por ejemplo, son parámetros fundamentales que determinan el comportamiento de la fachada ventilada en la demanda energética de la envolvente del edificio. Su caracterización exige un ensayo en condiciones exteriores y con probetas que reproduzcan las situaciones reales constructivas. Éstas son las bases del presente trabajo y el origen del conjunto de ensayos que conforman el estudio teórico de esta tesis. El objetivo es caracterizar una solución constructiva representativa de las fachadas comerciales que se ofertan en la actualidad y que se pueda encontrar en el catálogo de cualquier fabricante del sector. Para ello se eligen las siguientes muestras de ensayo:

- Muro base: el cerramiento de referencia que se emplea como base del estudio es un doble hoja de fábrica de ladrillo y cámara de aire intermedia. Sobre este muro se realiza el montaje del resto de sistemas de fachada ventilada.
- Muro base con aislamiento: al muro base se le aplica un sistema directo de aislamiento por el exterior, con el mismo material aislante que el empleado en la fachada ventilada. Este muro base y muro aislado, servirán como referencia de la demanda energética de fachadas sin aislamiento en edificios susceptibles de rehabilitación, y fachadas aisladas con sistemas SATE (*Sistemas de Aislamiento por el Exterior*) convencionales, que permitirán disponer de un valor comparativo respecto a los resultados obtenidos en las fachadas ventiladas.
- Fachada ventilada ligera: en la primera configuración se emplea como cierre de la hoja exterior placas de cemento de pequeño grosor. La cámara de aire es de espesor amplio con una única entrada inferior y una única salida superior.
- Fachada ventilada pesada: en la segunda configuración se emplea una hoja exterior pesada y con gran inercia formada por una placa de hormigón armado y en este caso una cámara de aire de pequeño grosor. En ambos casos el movimiento de aire es por convección natural.

- Fachada industrializada: como estudio complementario, se amplía la caracterización experimental a una tipología de fachada con características completamente diferentes a las definidas. Esta tercera muestra de fachada ventilada presenta una construcción ligera y seca, con soporte interior de panel sándwich prefabricado, hoja exterior de chapa galvanizada y movimiento de aire forzado en la cámara ventilada. Esta configuración está más orientada hacia nueva construcción y presenta, en principio, un mayor control y potencial de aprovechamiento energético de energías renovable, gracias a una mayor captación de calor procedente de radiación solar por la cortina de aire, siendo un ejemplo de las nuevas líneas de construcción en el sector de la edificación.

A continuación se pasa a detallar la construcción del conjunto de muestras y la instrumentación de medida instalada en cada ensayo.

4.1.1 Muro base

El muro base se ha definido de forma que sea representativo de un sistema de construcción lo más extendido posible. Para ello se ha seleccionado un muro de doble hoja con cámara de aire que corresponde con la solución de fachada empleada en el parque edificatorio a partir de la década de los 70 hasta la década de los 90, donde se produce un amplio desarrollo constructivo. En la Figura 4.1 se muestra el esquema constructivo. La muestra está configurada, de exterior a interior, por una hoja de ladrillo macizo perforado de 11,5 [cm] de espesor con junta horizontal y vertical continua de mortero, 2 [cm] de enfoscado de mortero hidrófugo, cámara de aire de 5 [cm] de espesor, fábrica de ladrillo hueco sencillo de 4 [cm] de espesor con junta horizontal y vertical continua de mortero, revestido con 2 [cm] de yeso. El ladrillo hueco sencillo tiene unas dimensiones medidas de 15 [cm] de alto, 30,5 [cm] de largo y 4 [cm] de espesor. El peso medio medido del bloque es de 1,924 kg. El ladrillo macizo perforado tiene unas dimensiones medidas de 10 [cm] de alto, 24 [cm] de largo y 11,5 [cm] de espesor. El peso medio medido del bloque es de 2,478 kg.

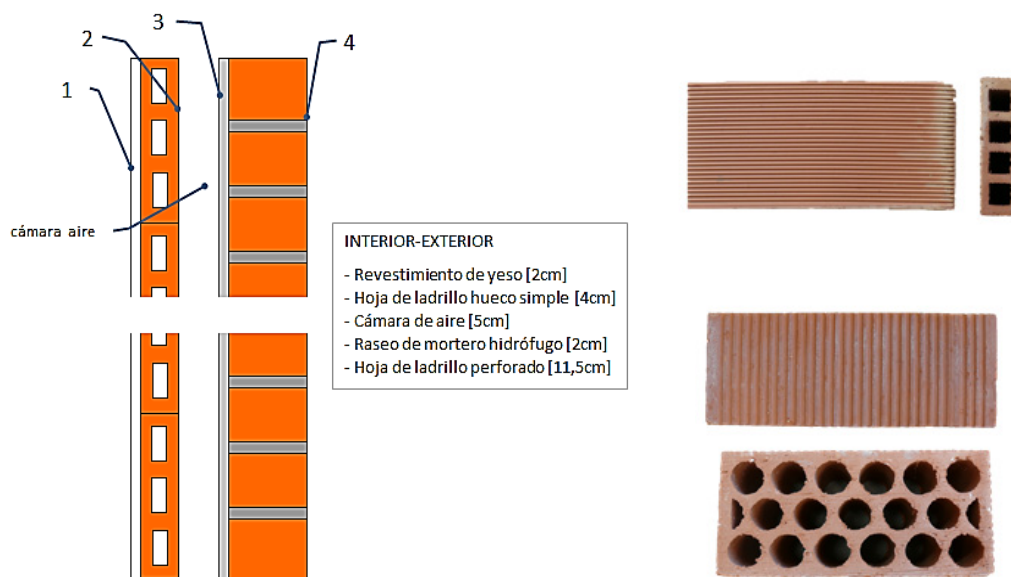


Figura 4.1 – Solución constructiva del muro base, y bloques cerámicos empleados en la construcción de cada hoja de la fachada



Figura 4.2 – Construcción de la hoja exterior en el portaprobetas

En la Figura 4.2 se muestra el levante de la hoja exterior de fábrica de ladrillo perforado, con el control de juntas y el revestimiento interior de mortero. En la Figura 4.3 se muestra el levante de la hoja interior de ladrillo hueco simple, comúnmente conocido como machetón, junto con el control del espesor de la cámara de aire y el revestimiento final de yeso de la cara interior. Como se puede ver, se cumple uno de los objetivos del diseño del ensayo *PASLINK* en lo relativo a poder emplear muestras que cumplan las características reales de la edificación. En este caso, la probeta construida presenta el mismo procedimiento constructivo que los muros de fachada que representa, reproduciendo tanto los materiales como el proceso de ejecución real.



Figura 4.3 – Construcción hoja interior, control del espesor de la cámara de aire y revestimiento final de yeso

Aprovechando el muro base, el siguiente componente que se ensaya es un muro con aislamiento convencional. Para ello se coloca sobre la cara exterior un *SATE*, empleando como material aislante lana mineral, el mismo material que se emplea en la capa de aislamiento en las muestras de fachada ventilada que se ensayan posteriormente. En la Figura 4.4 se muestra el esquema constructivo. El sistema *SATE* consiste en unos paneles de lana de roca de 5 [cm] de espesor, encoladas con mortero de revoco ligero para fijarlas al paño de ladrillo macizo perforado, ver Figura 4.5. Los

paneles empleados son de aplicación específica para este tipo de soluciones de aislamiento y para su aplicación en fachadas ventiladas, ya que presenta un núcleo de densidad de 40 [kg/m³] y una capa superficial de densidad 100 [kg/m³], lo que le aporta la rigidez necesaria para su colocación. Además, como medida de control, se le realiza un ensayo de conductividad según norma EN-ISO 12667^[64]. El valor obtenido para una temperatura media de 10°C, temperatura de referencia para los productos de edificación, es de $\lambda_{LR} = 0,039 \pm 0,002$ [W/mK].

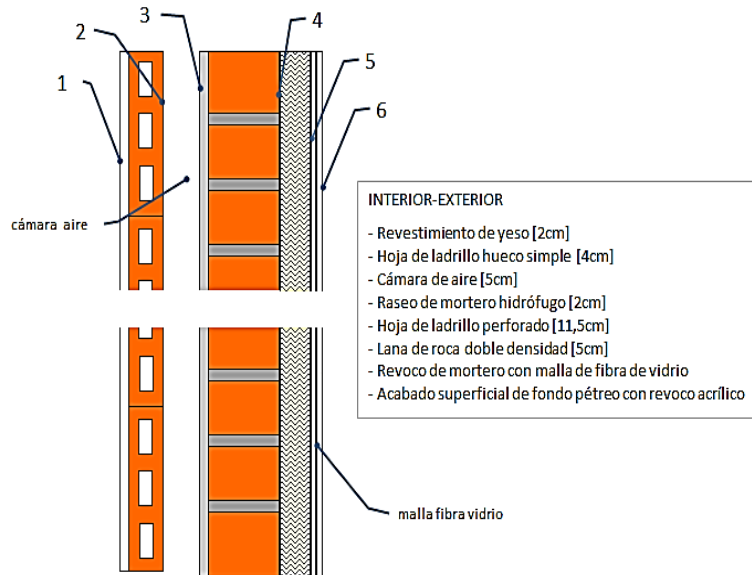


Figura 4.4 – Solución constructiva del SATE aplicado al muro base

Una vez fijadas y secas las placas, se aplica un revoco de refuerzo y nivelación de mortero con incorporación de malla de fibra de vidrio. A continuación se aplica un fondo pétreo y un acabado con revoco acrílico decorativo superficial, ver Figura 4.6. Todo el revestimiento superficial presenta un espesor final de 0,5 [cm]. Para caracterizar adecuadamente la muestra se instalan sensores de temperatura y flujo de calor en cada capa representativa. En los esquemas de la Figura 4. y Figura 4.4 se indican dichas capas para el muro base, cuatro capas en total, contando la superficie interior y exterior, y en el muro con aislamiento, que presenta dos capas más. En la Tabla 4.1 se recoge el número de sondas por capa y sus características. En total, en el muro base se instalan 15 sondas de temperatura y 4 sensores de flujo de calor y en el muro con aislamiento 25 sondas de temperatura y 8 sensores de flujo de calor.

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES				
			CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5	CAPA 6
MURO BASE	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5	5		
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1			
MURO BASE +SATE	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5			5
	Temperatura	Termopar tipo T			5	5	
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1	2	2	

Tabla 4.1 – Sensores instaladas en la probeta del muro base y en el muro aislado



Figura 4.5 – Colocación de la lana de roca sobre la hoja de ladrillo perforado



Figura 4.6 – Colocación de la malla de fibra de vidrio en el revoco de refuerzo y nivelación, imagen izquierda, y acabado final de fondo pétreo y revoco acrílico

En la Figura 4.7 se muestra un ejemplo de la disposición de las sondas sobre la muestra, en este caso para la superficie interior de la probeta, *capa 1*, en contacto con el ambiente de la sala de ensayos. Los esquemas completos de montaje se definen con mayor detalle en el Anexo C.

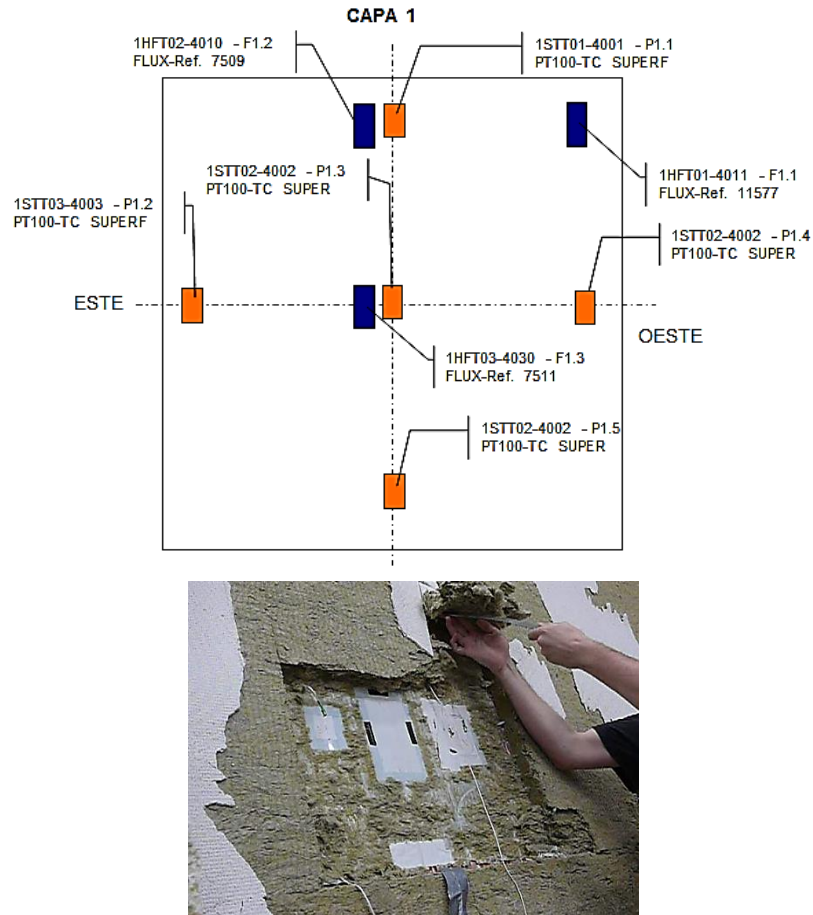


Figura 4.7 – Ejemplo de disposición de las sondas en la cara interior de la muestra, imagen superior, y sondas situadas en la *capa 4* durante el proceso de desmontaje de la muestra, imagen inferior

El objetivo de la disposición de los sensores es determinar adecuadamente la temperatura media de las diferentes superficies representativas de la muestra para poder caracterizar adecuadamente cada uno de los componentes de la fachada y poder detectar posibles desequilibrios en el gradiente de temperatura. En cuanto a los sensores de flujo de calor, se emplean como complemento a la medida principal de las *tiles*, como en el caso del ensayo *IQ-Test*, de forma que se puede disponer del flujo unidimensional como referencia y poder cuantificar, con una medida de contraste, los efectos de borde del sistema portaprobetas. A continuación se pasa a detallar la construcción de los sistemas de fachada ventilada estudiados.

4.1.2 Fachada ventilada ligera

Una vez ensayada la muestra del muro base, se retira el aislamiento colocado por la cara exterior y se instala una solución de fachada ventilada ligera. El esquema constructivo de la misma se indica en la Figura 4.8.

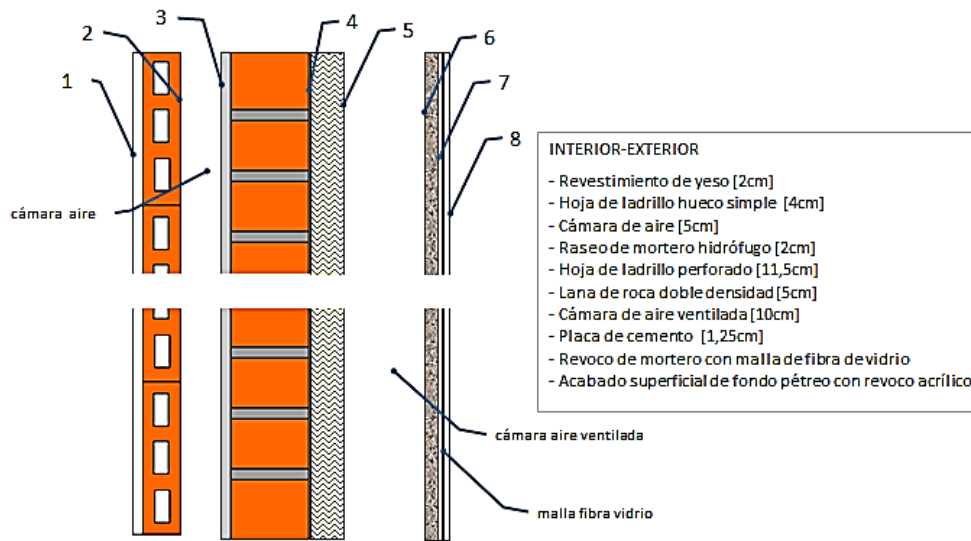


Figura 4.8 – Solución constructiva de la fachada ventilada ligera

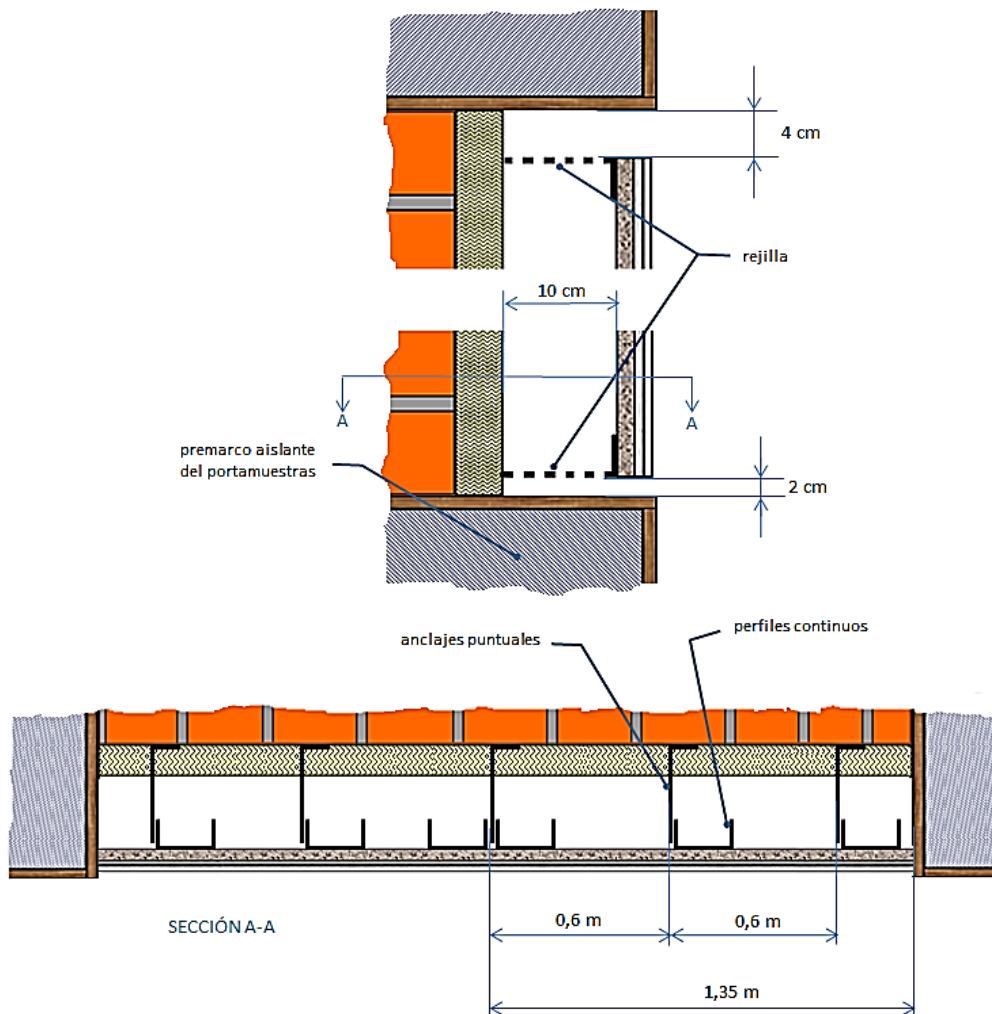


Figura 4.9 – Detalles constructivos de la probeta PASLINK correspondiente a la fachada ventilada ligera

Sobre la hoja de fábrica de ladrillo perforado se coloca nuevamente una capa de lana de roca de 5 [cm] de espesor, con las mismas características que la empleada anteriormente, luego se genera una cámara de aire ventilada de 10 [cm] de espesor mediante un sistema de perfiles y anclajes, y se cierra la fachada mediante una hoja ligera continua formada mediante placas de cemento de 1,25 [cm] de espesor, que se remata, por el exterior, con el sistema de mortero más malla de fibra de vidrio y revoco pétreo de acabado. En la Figura 4.9 se detalle el sistema de anclaje de la hoja ventilada. Sobre el muro de ladrillo se fijan una serie de anclajes puntuales sobre los que posteriormente se atornillan unos perfiles metálicos continuos que sirven de soporte para la colocación de las placas de cemento. Con esta configuración se intenta reducir los puentes térmicos en la capa de aislamiento debidos al sistema de soporte de la hoja ventilada. En la Figura 4.10 se muestra el proceso de colocación de los soportes puntuales, junto con una imagen de detalle de la configuración de los mismos. En la Figura 4.11 se muestra la colocación de la capa de aislamiento de lana de roca, con un detalle del efecto de los soportes. En la Figura 4.12 se muestra la instalación de los perfiles continuos, con un detalle de la fijación a los soportes puntuales, y la posterior colocación de las placas de cemento, junto con el control del espesor final de la cámara de aire ventilada.



Figura 4.10 – Colocación de los anclajes puntuales sobre el muro de ladrillo



Figura 4.11 – Colocación de la lana de roca y detalle de la penetración de los anclajes puntuales en la capa de aislamiento



Figura 4.12 – Montaje de la hoja exterior ligera



Figura 4.13 – Sellado de juntas de la hoja exterior y detalle de entrada de aire

Tras el sellado de juntas, ver figura 4.13, se aplica el acabado exterior de mortero con la malla de fibra de vidrio y el remate superficial de revoco pétreo, ver Figura 4.14. Una vez

definida la solución constructiva de la fachada ventilada y el proceso de construcción de la probeta de ensayo en la celda EGUZKI, se pasa a definir la instrumentación de ensayo empleada.



Figura 5.14 – Revestimiento final con el mortero, malla y revoco pétreo

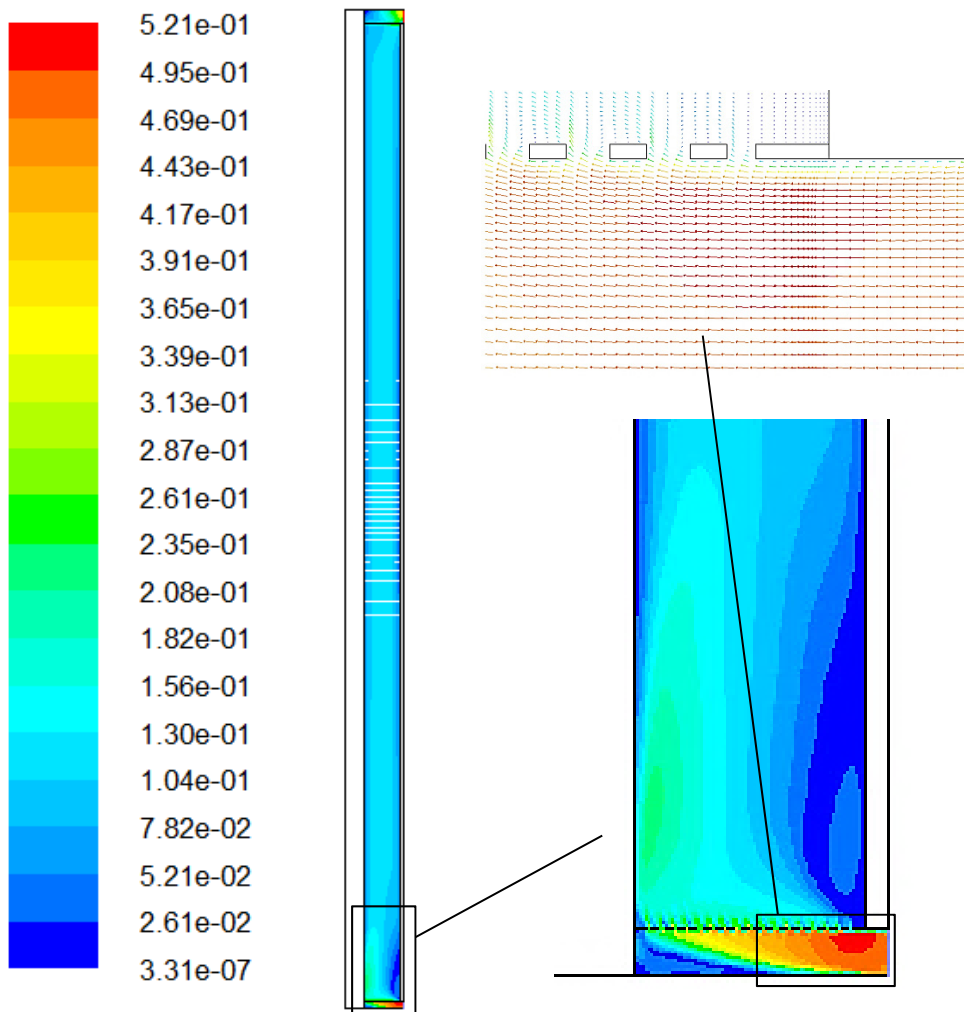


Figura 4.15 – Vectores de velocidad en el modelo de CFD de la cámara ventilada

Para poder seleccionar la disposición más adecuada de las sondas de velocidad de aire y temperatura en la cámara ventilada, de forma que permitan caracterizar adecuadamente el comportamiento de la fachada, se realiza un estudio mediante un modelo de volúmenes finitos empleando la herramienta de *CFD Fluent®*. Considerando que los efectos de los bordes laterales de la muestra son despreciables, el movimiento de aire de la cámara ventilada se puede representar mediante un modelo 2D. Las características del modelo se describen con mayor detalle en el apartado 5.2.2 del Capítulo 5. Para el análisis se emplea un modelo estacionario tomando una temperatura de aire exterior 10°C, temperatura de ambiente interior de 20°C, radiación solar de 300 [W/m²], y coeficientes de convección interior y exterior de 7,69 [W/m²K] y 25 [W/m²K], respectivamente. En la Figura 4.15 se muestran los vectores de velocidad de aire obtenidos por el modelo.

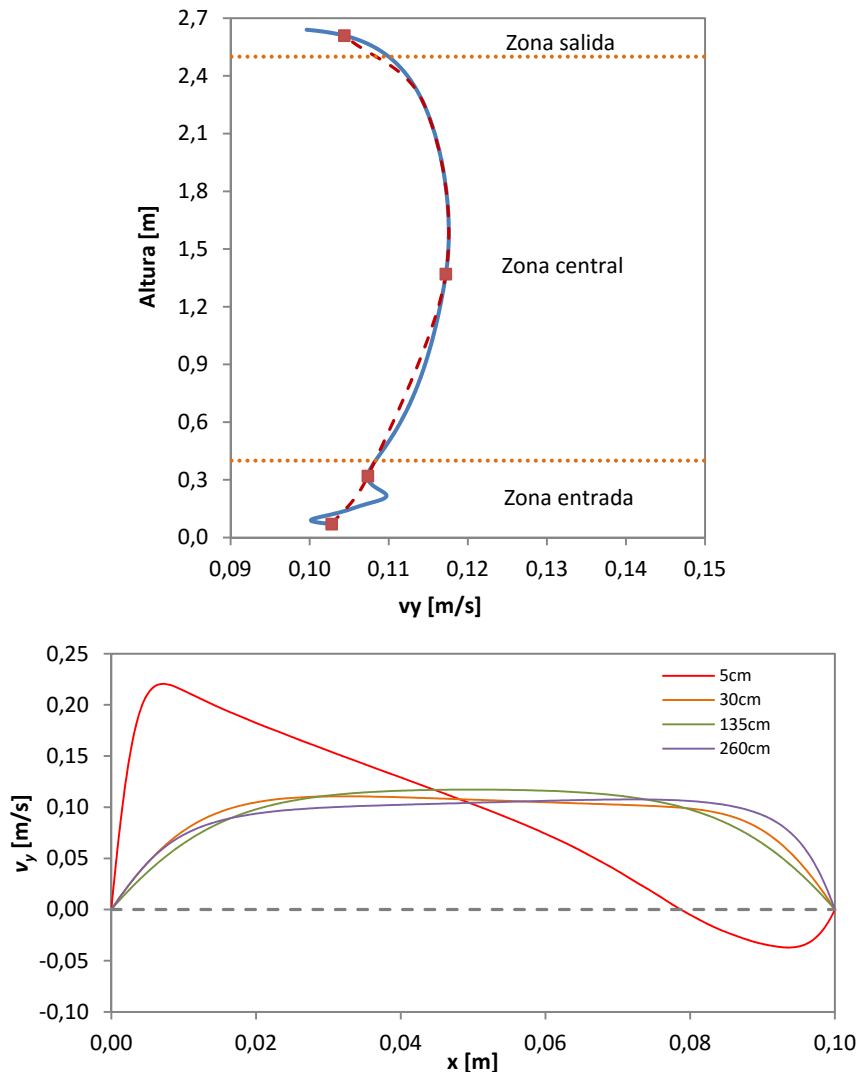


Figura 4.16 – Perfiles componente vertical de la velocidad, v_y , en el punto central respecto a la altura, curva superior, y perfil horizontal en los puntos con termoanemómetros instalados en la muestra

El primer resultado de interés que se obtiene del modelo es la velocidad media del aire dentro de la cámara, que toma valores del orden de 0,1-0,2 [m/s], por lo que la sondas de velocidad a instalar deben presentar una resolución y un rango de medida que cubra este intervalo. Por lo que se ha elegido un modelo de termoanemómetros que presentan un rango de medida de 0,01-1 [m/s], con una resolución de medida de

0,001 [m/s] y una incertidumbre de 0,01[m/s]. Otro resultado de interés es el alcance de los efectos de la entrada y la salida en el desarrollo del perfil de velocidades. Se puede observar cómo el aire se acelera en la sección de entrada y produce una zona de vórtice próxima a la placa de cemento. El efecto de la entrada desaparece a una altura máxima del orden de los 30 [cm], a partir de la cual el perfil de velocidades presenta el comportamiento logarítmico típico del flujo laminar. La componente vertical del vector de velocidad, v_y , es el parámetro de mayor interés, de cara a calcular el caudal de aire que atraviesa la cámara ventilada, Figura 4.16. En el perfil en altura se puede ver claramente la zona de entrada, y ya que es donde se producen mayores variaciones, se decide colocar dos sondas de velocidad en dicha zona, la primera a 5 [cm] de la rejilla de entrada y una segunda a 30 [cm]. Como el perfil en la zona central es muy homogéneo, se instala una sonda a media altura de la cámara, que corresponde con 135 [cm]. En cuanto a la zona de salida, el alcance del efecto de frenado se reduce a una distancia del orden de los 20 [cm] de la rejilla, generando menores perturbaciones que en la zona de entrada, por lo que se coloca otra sonda de velocidad a una distancia de 5 [cm] respecto a la misma, que corresponde con una altura total de 260 [cm]. Con estas cuatro sondas de velocidad se obtiene un perfil de ajuste, que se muestra en línea discontinua, que se superpone adecuadamente al perfil real calculado por el modelo.

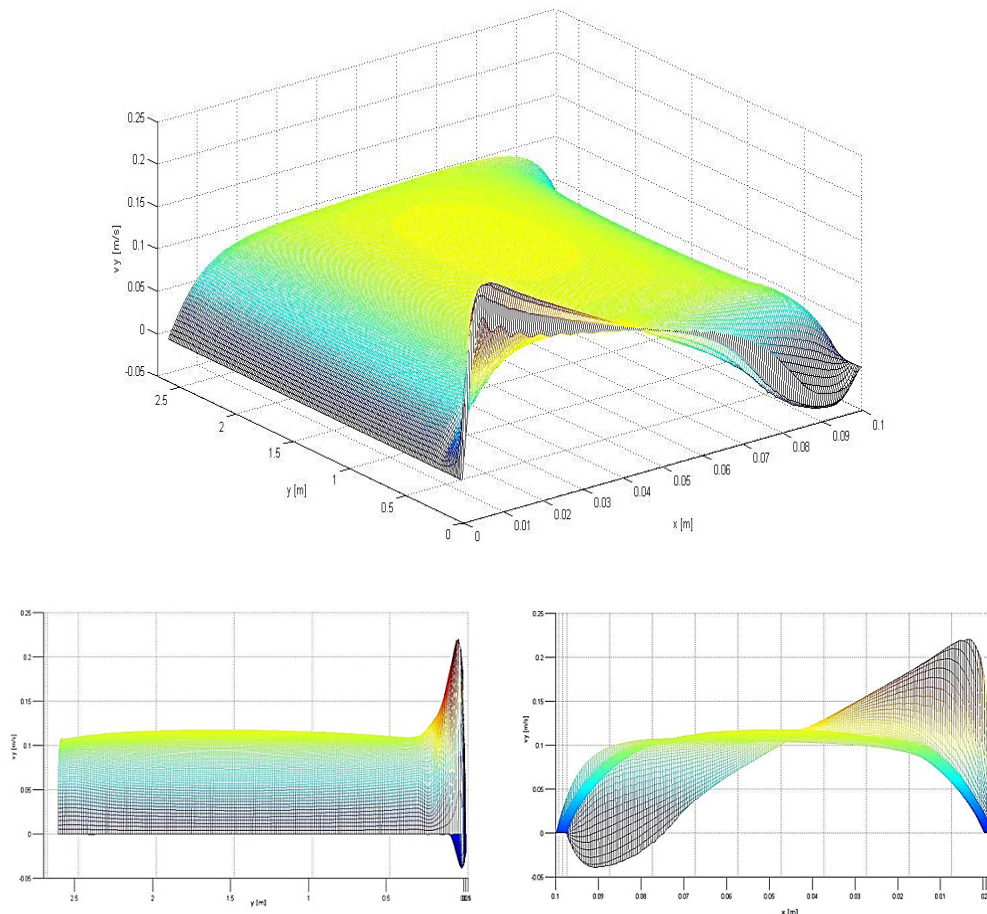


Figura 4.17 – Superficie de velocidades de la cámara ventilada

En la gráfica inferior de la Figura 4.16 se muestran los perfiles de velocidades horizontales para la componente vertical en cada uno de los puntos de medida seleccionados. Se puede ver cómo el punto inferior está afectado por el vórtice que se genera en la entrada con una zona de velocidades con sentido ascendente y otra zona con sentido descendente. Sin embargo, en el siguiente punto de medida, a 30 [cm] de

altura, ya se presenta un perfil homogéneo, que se reproduce a lo largo de toda la fachada, como muestran los perfiles del resto de puntos de medida. Una forma de evaluar con más detalle el efecto de la entrada y salida, respecto a la zona de comportamiento libre de la cámara de aire, es determinar la superficie de velocidades completa, ver Figura 4.17. Se puede observar cómo el campo de velocidades es homogéneo en la mayor parte. Una vez analizada la velocidad, es necesario verificar que los puntos de medida seleccionados son también adecuados para caracterizar el campo de temperaturas de la cámara de aire. En la Figura 4.18 se muestra el perfil en altura de la temperatura de aire en el eje central de la cámara y los perfiles horizontales en cada punto de medida.

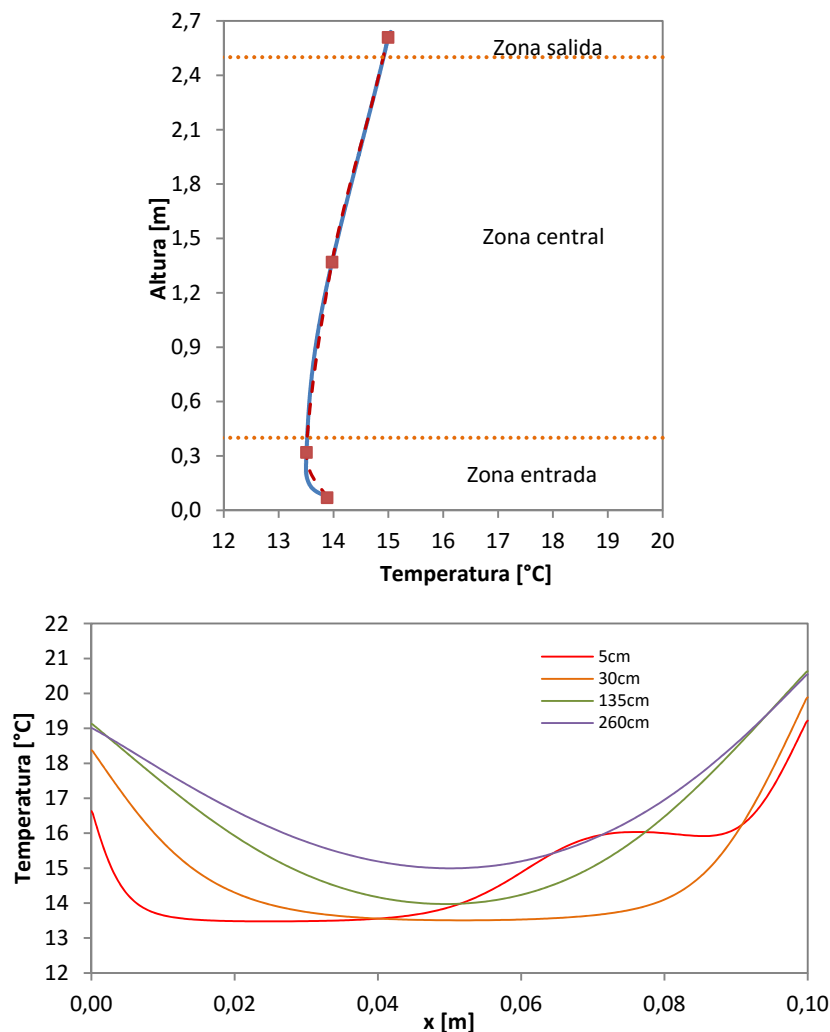


Figura 4.18 – Perfiles temperatura en el punto central respecto a la altura, curva superior, y perfil horizontal en los puntos de medida seleccionados

El efecto de la zona de entrada y salida presenta un alcance del mismo orden que en el campo de velocidades, y como se puede apreciar en la gráfica superior los puntos de medida permiten estimar el perfil de temperaturas de forma adecuada. Se puede observar cómo el vórtice de velocidades afecta al perfil horizontal de temperaturas, como muestra la gráfica inferior. Sin embargo en el perfil que se obtiene a los 30 [cm] de altura este efecto ya ha desaparecido y se puede apreciar el desarrollo de la capa límite de temperaturas con la altura.

En la Figura 4.19 se muestra la superficie de temperaturas completa para la cámara de aire. Se puede observar la repercusión de la turbulencia en la entrada sobre las temperaturas del aire, y como se va desarrollando el calentamiento del aire con el flujo de calor aportado por las dos superficies de la cámara ventilada.

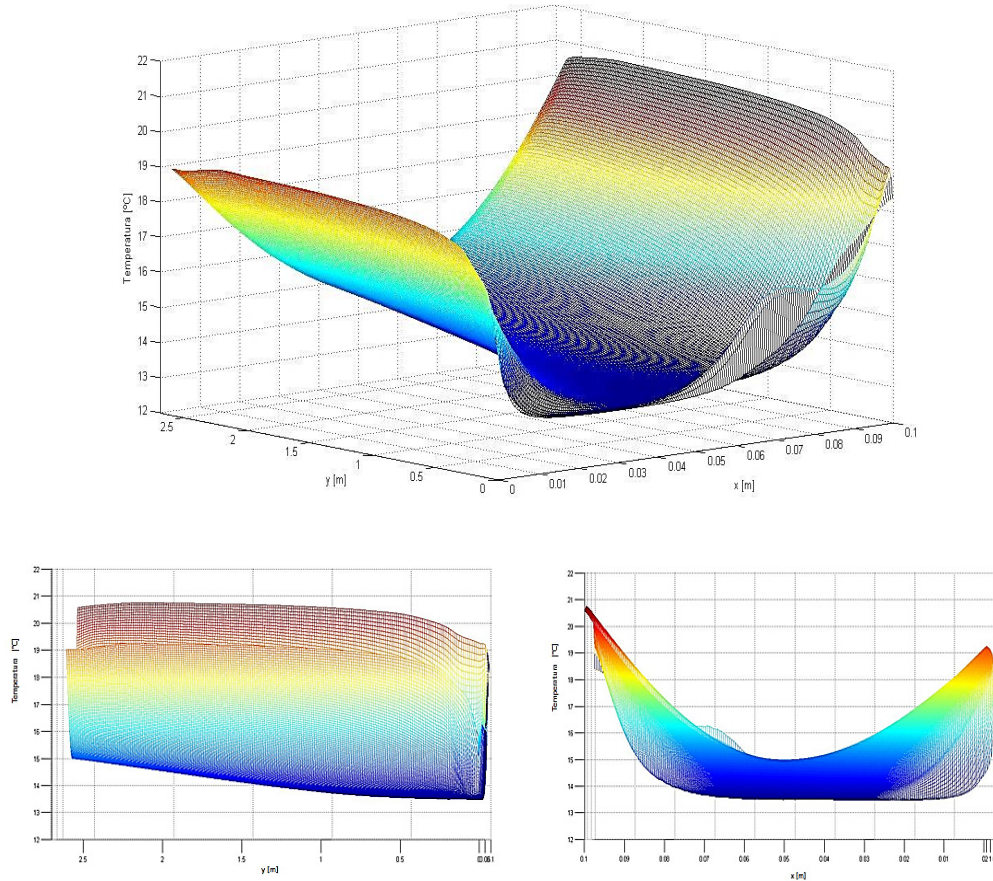


Figura 4.19 – Superficie de temperatura de la cámara ventilada

En la Tabla 4.2 se recoge el conjunto de instrumentación finalmente instalada en la probeta del muro base con la fachada ventilada ligera, incluyendo la instrumentación instalada en la cámara de aire. En total se colocan 50 sondas de temperatura, 11 fluxímetros y 4 termoanemómetros. Las características de medida de cada sonda se indican en el apartado 1.3.3 del Capítulo 1.

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES						
			CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5-6	CAPA 7	CAPA 8	CA
MURO BASE + FV L	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5		6		6	6
	Temperatura	Termopar tipo T			5		6		
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1		3			
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1							4

Tabla 4.2 – Sensores instalados en la probeta de fachada ventilada ligera

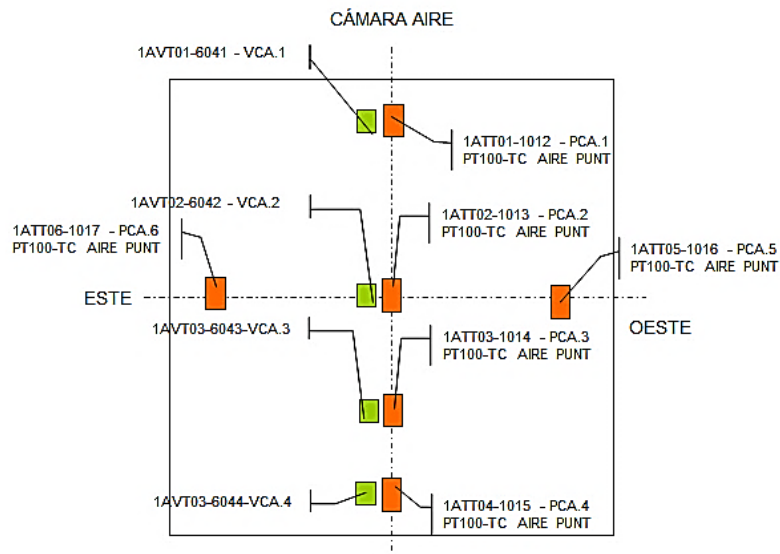


Figura 4.20 – Esquema de montaje de las sondas en la cámara de aire, y detalle de instalación de los termoanemómetros

En la Figura 4.20 se muestra el esquema de montaje de las sondas de temperatura y velocidad de aire en la cámara ventilada. Como se ha planteado ya en el modelo de CFD, se considera que el comportamiento térmico del movimiento de aire se puede considerar 2D, y por tanto mediante el perfil central de temperaturas y velocidades se puede estudiar el movimiento convectivo con precisión. La zona sensible de los instrumentos de medida, tanto de velocidad como de temperatura, se sitúa en el eje central de la cámara de aire, a 5 [cm] de profundidad. En la Figura 4.20 se muestra una imagen del control de la profundidad de inserción de los termoanemómetros en la cámara ventilada. Se instalan dos sondas de temperatura adicionales, próximas a los bordes laterales de la muestra, con el mismo esquema de montaje que en las capas interiores del muro base, para controlar la homogeneidad del campo de temperaturas. En la Figura 4.21 se muestra las sondas de medida instaladas en las superficies que forman la cámara ventilada, *capas 5 y 6*. Como ejemplo, se puede ver el esquema de montaje de la instrumentación en la superficie del aislante, *capa 5*. En la cara interior de la placa de cemento el montaje es simétrico. Las sondas se colocan simultáneamente según se va cerrando la capa exterior de la muestra de fachada ventilada, como se puede ver en la imagen de la derecha. En este caso, junto a las sondas de temperatura del eje central, se instalan sensores de flujo de calor en ambas caras de la cámara. En

los modelos de convección, el flujo de calor es una de las variables más importantes, y su medida es la que aporta mayor incertidumbre en los cálculos. En este estudio, aunque los flujos de calor se van a cuantificar mediante los modelos de pared, el disponer de medidas puntuales a lo largo de la cámara ventilada, permite disponer de valores de referencia que se pueden emplear como contraste de los resultados obtenidos. Hay que tener en cuenta que la medida de los sensores de flujo de calor es muy dependiente de los coeficientes de convección, y precisamente estos coeficientes van cambiando en función del flujo que se desarrolla en el proceso de flotación, por lo que serán datos a tratar con especial detalle y carácter crítico. De hecho, en el punto de entrada de la cámara ventilada no se ha instalado ningún fluxímetro ya que las turbulencias que se generan en esta zona desvirtuarían cualquier posible medida del flujo de calor.

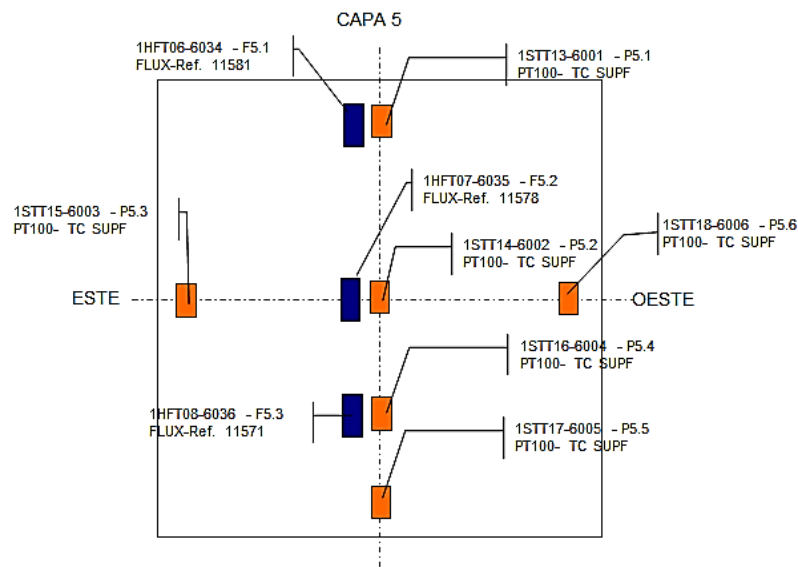


Figura 4.21 – Ejemplo de disposición de las sondas en las superficies que forman la cámara ventilada, imagen izquierda, y detalle de la instalación de los sensores

Este primer ensayo de fachada ventilada sirve como punto de partida para adquirir experiencia en la caracterización de las cámaras ventiladas. En el siguiente ensayo, correspondiente a la caracterización de una hoja exterior pesada, se revisa la instrumentación de la muestra con los conocimientos adquiridos durante el proceso de modelado de la fachada ligera. En el siguiente apartado se pasa a describir dicha muestra.

4.1.3 Fachada ventilada pesada

Una vez estudiado el comportamiento térmico de una de las soluciones de fachada ventilada más extendida en el sector de la edificación se analiza una variante que contemple el efecto de la inercia en la hoja exterior. Para ello se sustituye la hoja ligera de placa de cemento por una hoja pesada de hormigón armado de 8,5 [cm] de espesor. Otro parámetro que se modifica es la anchura de la cámara de aire. De esta forma también se dispone de información respecto al efecto de dicho espesor en las velocidades y caudales de aire que se alcanzan en la cámara ventilada. Con estos parámetros se plantea la solución de muestra que se indica en la Figura 4.22.

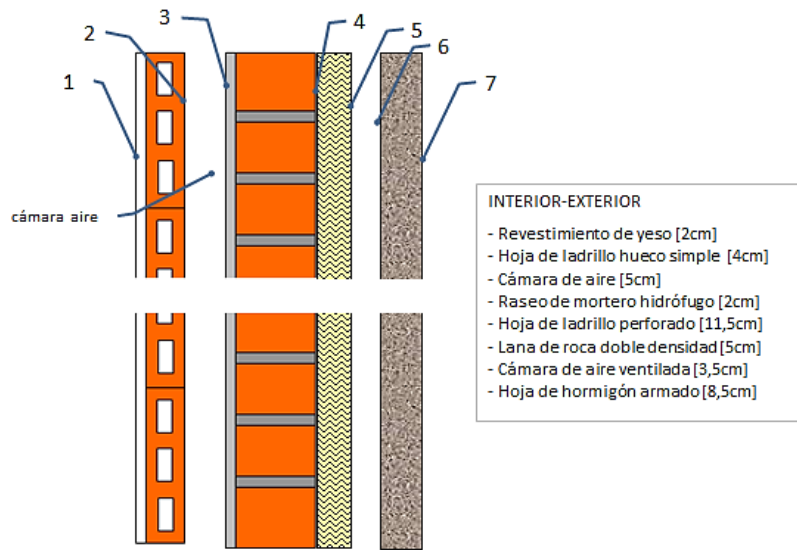


Figura 4.22 – Solución constructiva de la fachada ventilada pesada

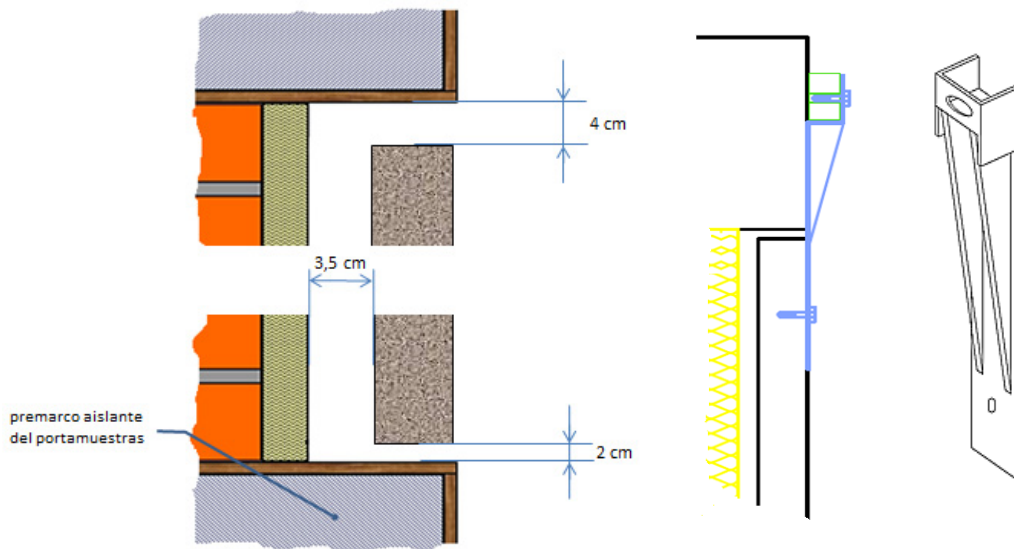


Figura 4.23 – Detalles constructivos de la probeta PASLINK correspondiente a la fachada ventilada pesada, y sistema de anclaje de la hoja exterior de hormigón

Un aspecto importante en el caso de esta muestra, es cómo resolver el sistema de montaje de un componente tan pesado, como es la hoja de hormigón, en el sistema de portaprobetas, de cara a asegurar la estabilidad de la muestra durante el ensayo, y de cara a la seguridad en la manipulación de la misma. Como solución final, se ha optado por colgar la hoja pesada de tres escuadras de acero que se atornillan a la estructura metálica del portamuestras. En la Figura 4.23 se muestra el esquema constructivo de la probeta y el mecanismo de montaje de los soportes. La hoja de hormigón armado tiene un peso del orden de 1,2 [Tn], por lo que su manipulación y montaje es complejo.

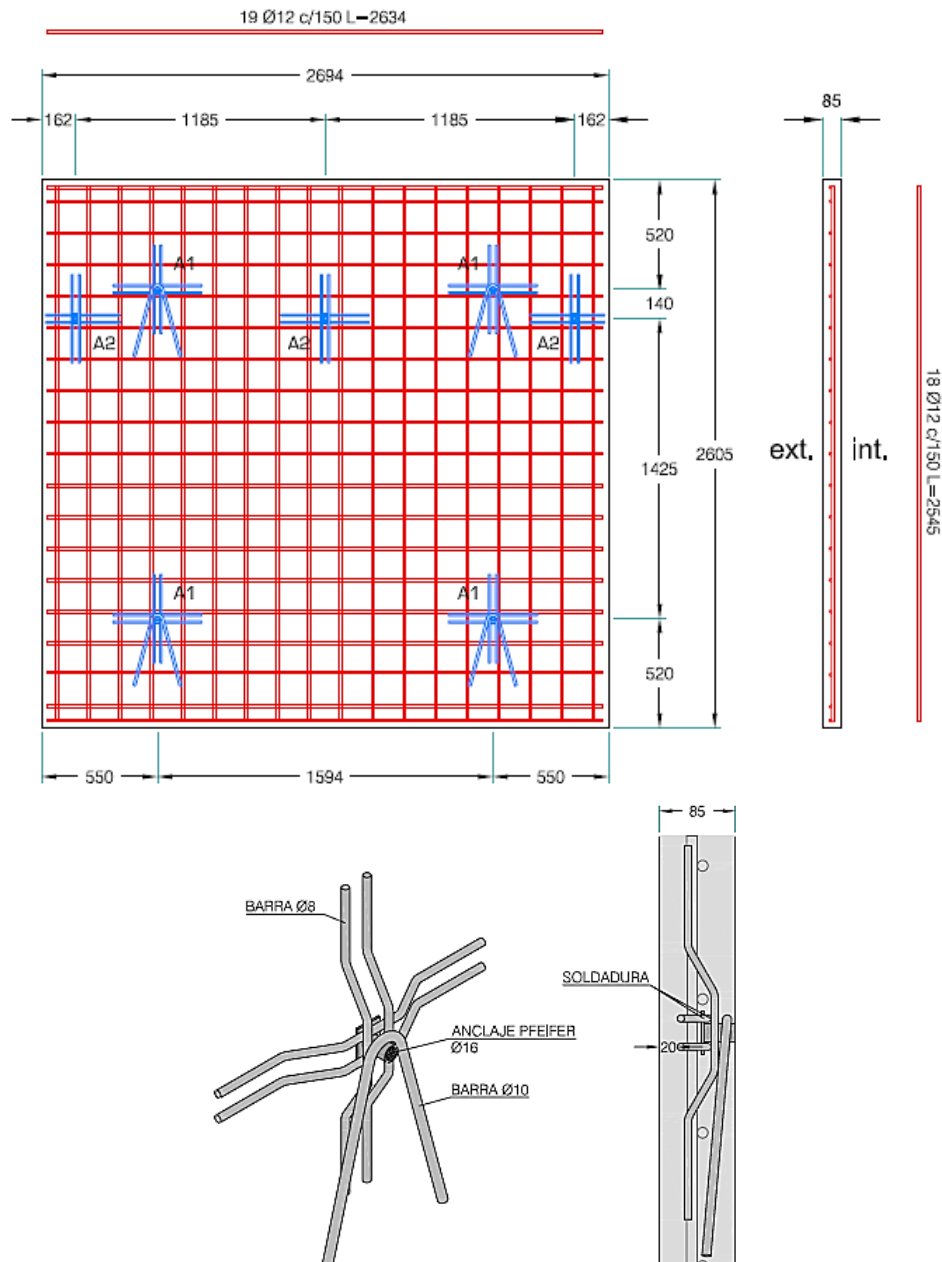


Figura 4.24 – Detalles constructivos de la placa de hormigón armado y de los anclajes Pfeifer para su manipulación

Para facilitar el proceso de construcción de la probeta en el laboratorio, se instalan una serie de anclajes tipo *Pfeifer*. Se colocan cuatro anclajes repartidos homogéneamente por la placa para su movimiento con grúa-puente en el interior de pabellón donde se

construye la probeta, además de los tres anclajes donde se colocarán las pletinas de fijación al portamuestras. En la Figura 4.24 se muestra el esquema constructivo de la placa de hormigón con la disposición de la armadura y de los puntos de anclaje junto con el detalle constructivo de los mismos. En la Figura 4.25 se muestra la placa de hormigón con la instrumentación de la superficie interior colocada, y el muro base con la capa de aislamiento. Para asegurar que la probeta presenta una cámara de aire del espesor deseado se colocan cuatro topes de madera de 3,5 [cm] de grosor que sirven como apoyo guía para la colocación de la placa de hormigón. En la Figura 4.26 se muestra el proceso de colocación de la hoja de hormigón en el muro base y la instalación de los anclajes metálicos. Durante el montaje de la muestra se anclan dos cables de acero cruzados por delante de la muestra, para mayor seguridad, como se puede apreciar en la imagen de la derecha. Los cantos laterales de la hoja exterior se sellan con espuma de poliuretano, de forma que el aire de la cámara ventilada solo circule a través de la entrada inferior y la salida superior.



Figura 4.25 – Hoja de hormigón con la instrumentación de medida colocada y muro base con los topes de apoyo para la formación de la cámara ventilada



Figura 4.26 – Proceso de montaje de la hoja exterior de hormigón

En la Figura 4.27 se muestra los detalles del sellado y el control de los espesores de la entrada y salida obtenidos en la probeta. Una vez finalizada la probeta se traslada mediante un carro de transporte de muestras desde el pabellón a las inmediaciones de

la celda. Y mediante una grúa se finaliza la colocación de la muestra en la celda EGUZKI. La capacidad de construcción de las muestras en condiciones controladas y en el interior de un pabellón es una de las grandes ventajas del sistema PASLINK de ensayo.



Figura 4.27 – Control espesor secciones de salida y entrada y sellado de los laterales de la placa exterior



Figura 4.28 - Movimiento de la muestra desde el pabellón de montaje y colocación en la celda EGUZKI

La manipulación de probetas tan pesadas como la correspondiente a la fachada ventilada con hoja de hormigón complican en gran medida su construcción in-situ, con

el consiguiente riesgo de deterioro del propio equipo de medida. Además, el trabajar sobre un bastidor de montaje asegura una mayor precisión en la instalación de los sensores de medida que participarán en la fase de caracterización. En la Figura 4.28 se muestra el proceso de colocación de la muestra en la celda, que se ha descrito anteriormente. En la Figura 4.29 se muestra el estado final de la probeta de fachada, lista para comenzar el periodo de ensayo. Se conectan los sensores instalados en la probeta y se retiran los cables de seguridad. En la Tabla 4.3 se recoge dicha instrumentación. Gracias a la experiencia adquirida durante el ensayo, y posterior estudio de modelado realizado a la fachada ligera, se adapta la instrumentación para mejorar la calidad de la información contenida por los datos registrados. Se instalan un total de 48 sensores en la muestra.



Figura 4.29 - Probeta final instalada con parte de la instrumentación colocada

En este ensayo se instala una termopila formada por 10 puntas de medida. Dentro de la muestra se disponen 5 puntas en cada sección, entrada y salida, distribuidas a lo largo de toda la superficie de circulación del aire. Con este sensor se mide la diferencia de temperatura que experimenta el aire a en su circulación a lo largo de la cámara con una resolución de $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. Además, al cubrir toda la sección de la cámara se aumenta en gran medida la cuantificación de la energía absorbida por la cortina de aire, uno de los principales parámetros en el estudio térmico de la fachada ventilada. También se amplía el número de sondas de temperatura de aire para cuantificar el efecto de los bordes de la muestra en el comportamiento de la cámara ventilada. En la Figura 4.30 se muestra un esquema de la instrumentación colocada para la caracterización del comportamiento del movimiento del aire en la cámara ventilada. En la Figura 4.31 se puede ver un detalle de las sondas de aire y de los puntos inferiores de la termopila, situados en la cámara ventilada. Por otro lado, se instalan sensores de presión diferencial para medir las pérdidas de carga en la entrada y salida de la cámara. Este parámetro presenta un peso importante en el ajuste del modelo de CFD de la fachada, como aporta la experiencia obtenida del estudio del primer ensayo realizado sobre la fachada ventilada ligera. Para obtener un valor de presión diferencial medio en la sección, se mide la presión en tres puntos, central y extremos, que se conectan a un conducto único que va al sensor. Además, se aprovechan los propios conductos de

presión para colocar un tercer sensor que mida la pérdida de carga a lo largo de la cámara ventilada.

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES					
			CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5-6	CA	CAPA 7
MURO BASE + FV P	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5		6	10	5
	Temperatura	Termopar tipo T			5			
	Dif Temperatura	Temopila tipo T 10 puntas					1	
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1				
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1					4	
	Dif Presión	Ahlborn FD8612DPS/APS						3

Tabla 4.3 – Sensores instalados en la probeta de la fachada ventilada pesada

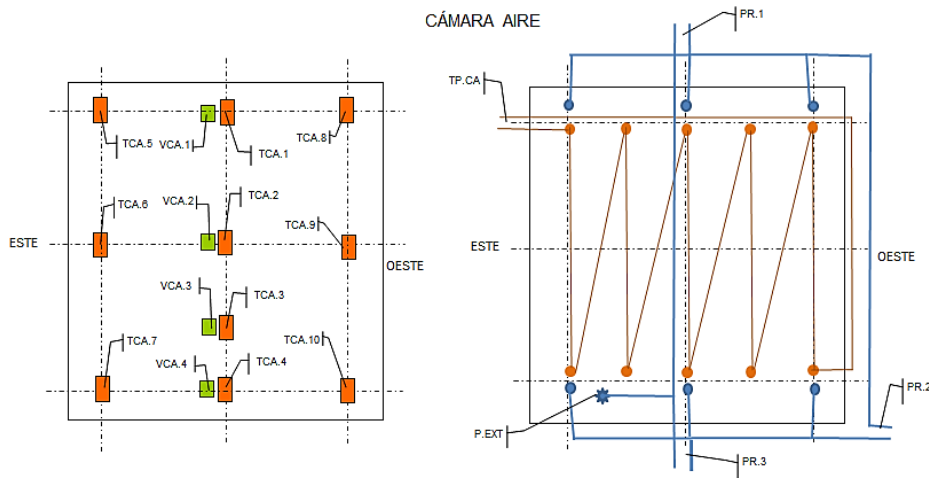


Figura 4.30 – Instrumentación instalada en la cámara de aire de la fachada ventilada pesada



Figura 4.31 - Cara interior de la muestra con las sonda de temperatura de aire, izquierda; termopila instalada en la cámara ventilada, derecha

En cuanto a la medida de la velocidad de aire, la disposición y número de termoanemómetros utilizados en el ensayo de la fachada ligera han demostrado ser adecuados para caracterizar el desarrollo del caudal de aire en altura. Por lo que no se realiza ningún cambio en este aspecto de la instrumentación. Manteniendo los cuatro sensores de velocidad y la disposición relativa de los mismos en la cámara ventilada. En la Figura 4.32 se muestra un detalle de las sondas de velocidad de aire y los latiguillos

de medida de la presión diferencial. En el Anexo C se recoge con más detalle la disposición exacta de toda la instrumentación. Una vez desarrolladas las probetas de ensayo se pasa a analizar los datos experimentales obtenidos.



Figura 4.32 - Sondas de presión y velocidad de aire de la cámara ventilada

4.1.4 Fachada ventilada forzada

Para finalizar la parte experimental del presente trabajo se realiza el ensayo de una fachada ventilada forzada. El prototipo analizado es totalmente diferente a las soluciones de fachada estudiadas previamente. En este caso, el sistema constructivo es de carácter ligero e industrializable, de forma que el montaje es seco y emplea componentes prefabricados. El esquema constructivo se muestra en la Figura 4.33, y consiste en un panel sándwich formado por un núcleo de poliuretano de 6 [cm] de espesor, que aporta el aislamiento térmico de la fachada, y la piel exterior que está formada por chapas de acero galvanizado de 2 [mm] de espesor. El objetivo de este montaje es disponer de una solución modular que posteriormente se pueda adaptar a cualquier configuración de edificio. La otra diferencia es que el movimiento de aire dentro de la cámara ventilada se realiza de forma forzada mediante extracción mecánica controlada. Para ello, se dispone de tres tolvas de extracción situadas en la parte superior de la probeta, que se conectan a un conducto único en el que se sitúa la soplante. El diseño y construcción de la muestra de ensayo ya se adelanta en el *Capítulo 1, apartado 1.3.2*. Por lo que, en este punto, se aprovecha para definir con más detalle los puntos importantes de la muestra, como son la zona inferior de entrada de aire, y la zona superior de extracción con la configuración de tolvas. En la Figura 4.34 se muestra el esquema inicial de diseño y la probeta final instalada en la celda *PASLINK*. El diseño de fachada es muy sencillo y requiere de un número reducido de materiales, además de presentar un sistema de montaje seco y rápido de realizar, como ya se ha comentado. En la imagen de la Figura 4.35 se muestra el conjunto total de materiales que conforman la muestra de ensayo. La hoja interior de la muestra se configura mediante tres paneles sándwich machiembreados con rotura de puente térmico entre las chapas superficiales y en las zonas de conexión entre piezas, ver Figura 4.36. Los paneles se sitúan sobre unos perfiles fijados al marco del portamuestras, que sirven de guía para el montaje, y en los que se coloca una banda de material aislante para reducir los efectos de puente térmico con el ambiente de la sala de ensayos, ver Figura 4.37. En este caso, la muestra se sitúa a ras del borde exterior del portamuestras. Como se ha analizado en el *Capítulo 4*, a través del estudio de interlaboratorios, esta es la posición más desfavorable respecto a los efectos de borde del premarco aislante del

portamuestras, pero por la necesidad de instalar el sistema de tiro forzado de la cámara ventilada, es la única opción constructiva. En la imagen central inferior de la Figura 4.38 se puede observar los 3 [cm] que se dejan para la cámara de aire ventilada.

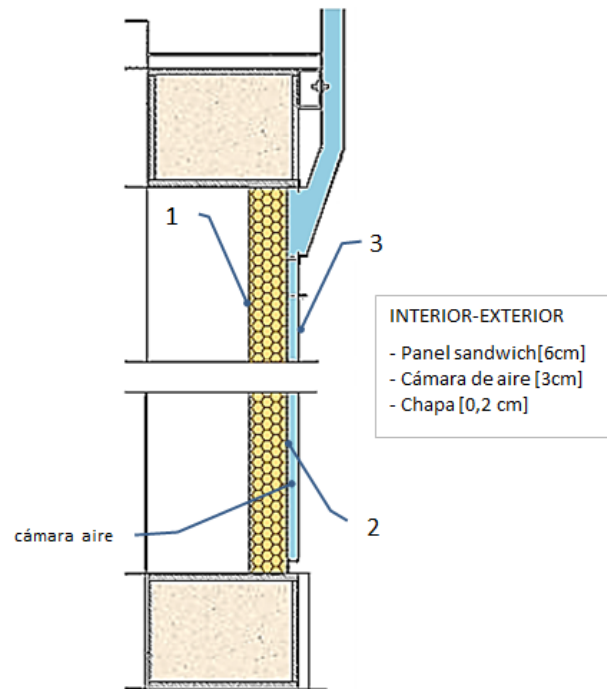


Figura 4.33 – Solución constructiva de la fachada ventilada forzada

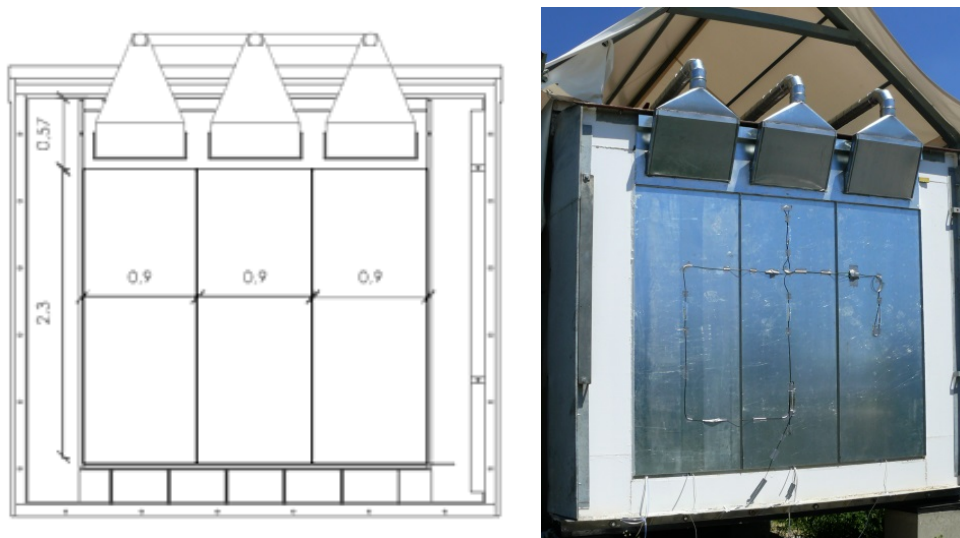


Figura 4.34 – Diseño de probeta de ensayo y muestra final

Una vez montada la hoja interior completamente, se realiza un sellado de las juntas y de los bordes perimetrales de la muestra para asegurar una buena estanqueidad y alcanzar así, los requisitos de infiltraciones en la sala de ensayos, ver Figura 4.38. En cuanto al montaje de la hoja exterior, el punto más complejo es el diseño del sistema de extracción de la parte superior de la muestra. Ya que se deben evitar zonas de estancamiento de aire, y el propio sistema de extracción no debe arrojar sombra sobre la superficie de la muestra. Otro aspecto importante es el sellado de juntas de la piel exterior. El aire debe entrar por la parte inferior de la cámara y extraerse por la parte

superior, para obtener la máxima eficiencia en la recolección de calor, de forma que todas las infiltraciones que existan disminuirán dicha eficiencia de captación, teniendo más repercusión si estas infiltraciones se producen en zonas próximas a la extracción, ya que será aire que no recorre la superficie de la muestra, y por tanto no absorbe calor.



Figura 4.35 – Materiales para el montaje de la muestra de fachada forzada



Figura 4.36 – Detalle de la rotura de puente térmico en los paneles sandwich



Figura 4.37 – Montaje de la hoja interior en el portamuestras



Figura 4.38 – Hoja interior montada y detalle del sellado de juntas

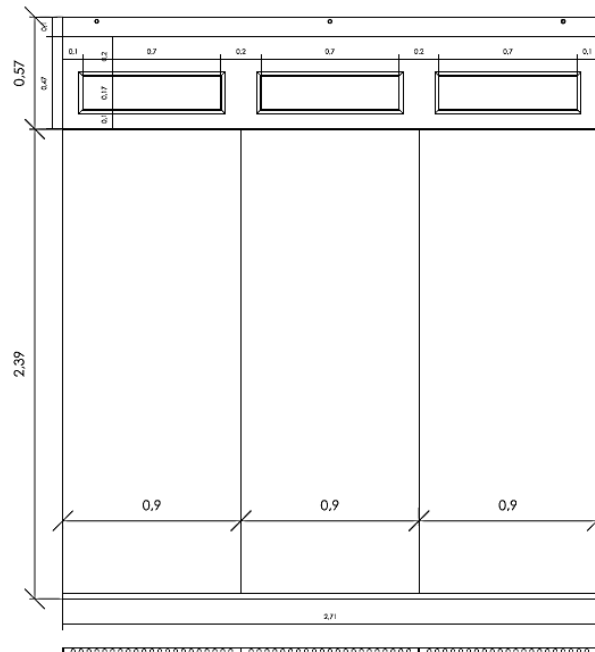


Figura 4.39 – Diseño y montaje de la hoja exterior en la muestra de fachada forzada

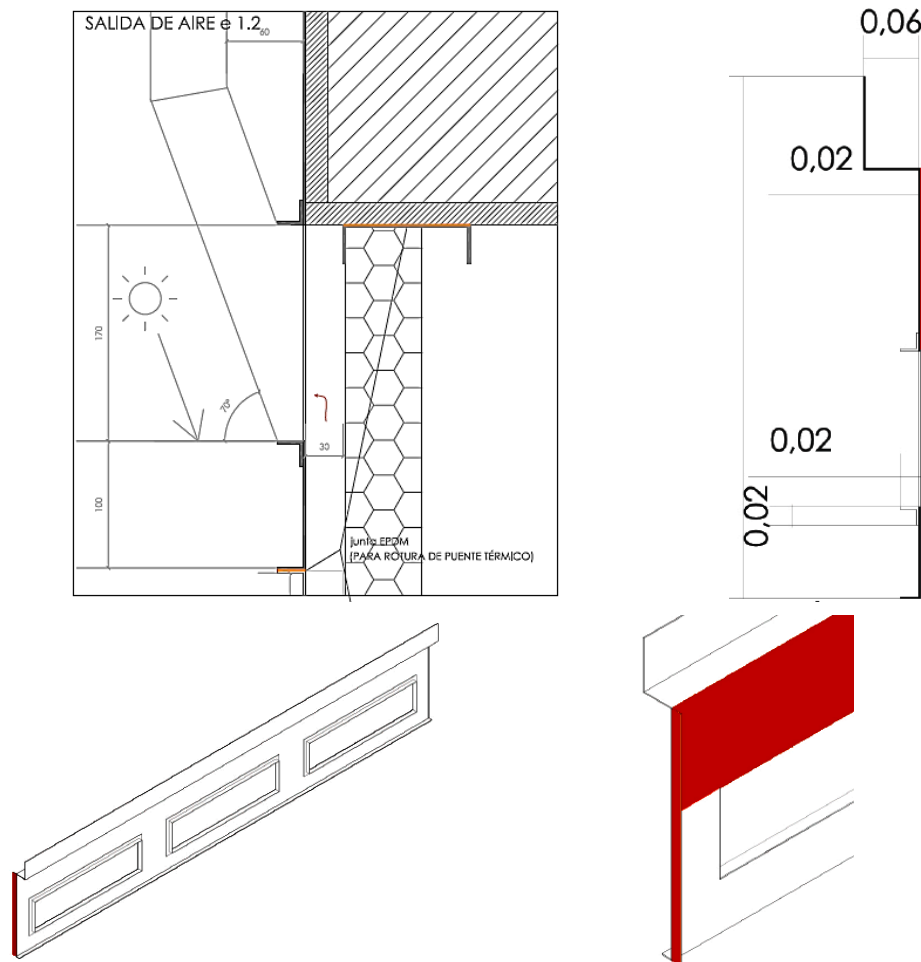


Figura 4.40 – Diseño de la chapa superior de extracción

Teniendo en cuenta los condicionantes del ensayo, la hoja exterior de la probeta se configura mediante tres placas de $0,9 \times 2,39$ [m], que incluyen el sistema de entrada en su parte inferior, y una pieza superior de remate con tres huecos que sirven de conexión al sistema de extracción. En la Figura 4.39 se muestra un detalle constructivo y una imagen del proceso de montaje. Las placas de chapa se atornillan entre sí y se dispone en todas las zonas de junta una banda de caucho para asegurar el sellado. La placa superior, se fija a las tres hembras roscadas que dispone el premarco metálico. El sellado de esta placa es más complejo, y el diseño de la geometría se ha realizado para salvar los diferentes relieves del sistema de portamuestras, de forma que las secciones de extracción coincidan con la parte superior de la muestra, eliminando posibles zonas de estancamiento del aire en la cámara ventilada. En la Figura 4.40 se muestra con detalle la geometría y disposición de la probeta en la celda de ensayo. En color naranja se indican las zonas en las que se coloca la banda de caucho para sellado. En cuanto al diseño de las tolvas de extracción, de cara a evitar sombras sobre la muestra, se calcula el ángulo de incidencia solar máximo y se diseña la geometría en función al mismo. En la imagen superior de la Figura 4.40 se muestra dicho cálculo. En la Figura 4.41 se muestra el diseño de tolvas junto con el proceso de montaje y sellado de juntas. Para obtener una buena homogeneidad en la cortina de aire circulante por la cámara ventilada, se disponen tres tolvas de extracción, una por cada sección de chapa que conforman la muestra. Estas tolvas se conectan a tres conductos con sendas válvulas de regulación, de forma, que se pueden equilibrar las pérdidas de carga en cada zona de extracción para obtener un caudal idéntico en cada una de ellas. Los tres conductos se conectan a un tubo único que finaliza en la soplante.

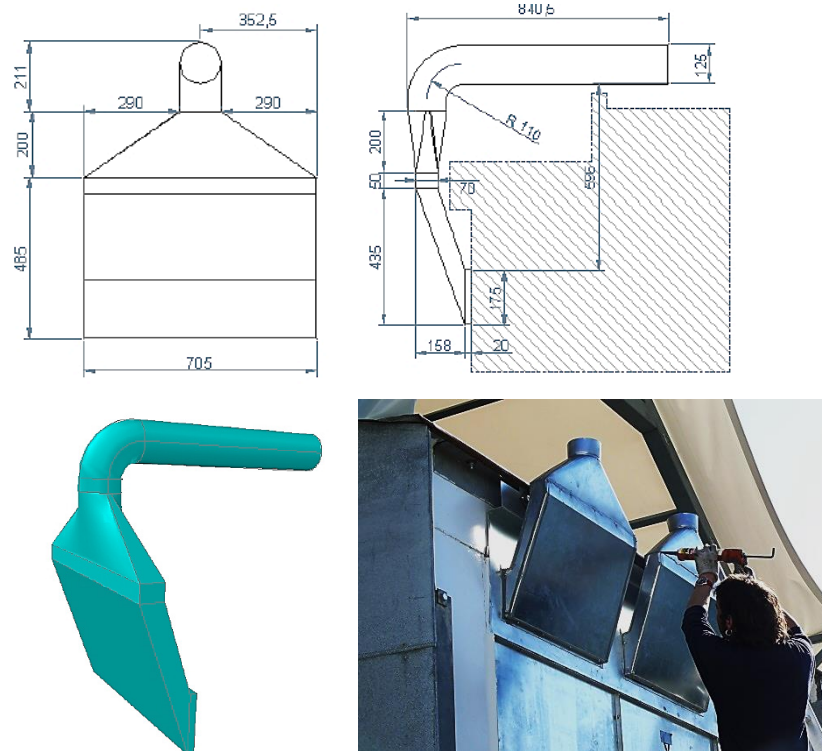


Figura 4.41 – Diseño de las tolvas y montaje en la muestra

En la Figura 4.42 se muestran los tres conductos de extracción junto con las válvulas de regulación, y el conducto único conectado a la soplante. En cuanto a la zona de entrada de aire, el diseño es muy sencillo, mediante un doblar de las chapas de la capa exterior se conforma la sección de entrada. De esta forma se asegura el espesor de la cámara de aire, ya que trabajar con 3 [cm] es complejo, y se puede dar el caso de zonas de estrechamiento que podrían estrangular el paso de aire. Con esta configuración se asegura un espesor constante de la cámara en toda la altura de la muestra. Además, para evitar la posible entrada de elementos externos en la cámara, la sección de paso se obtiene mediante orificios perforados en la chapa. En la Figura 4.43 se muestra el esquema del diseño y una imagen del estado final de la cámara ventilada durante el proceso de construcción de la muestra.



Figura 4.42 – Sistema de extracción forzada de la cámara ventilada

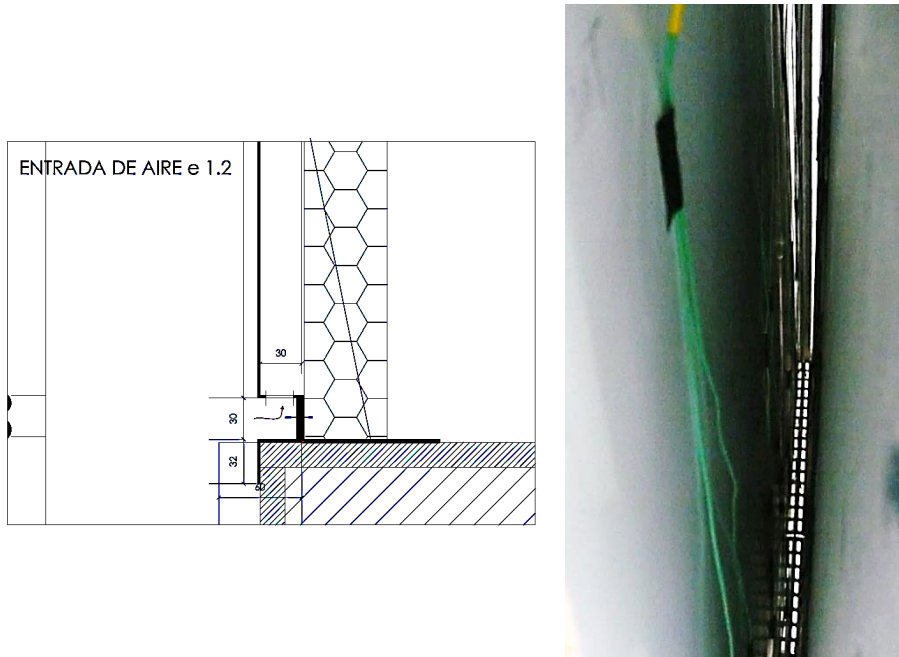


Figura 4.43 – Zona de entrada de la cámara ventilada en la fachada forzada

En lo relativo al proceso de montaje, tras construirse la hoja interior, se coloca la hoja exterior en la bancada de trabajo situada en el pabellón. Previamente se coloca toda la instrumentación de la cámara ventilada. En este punto, la muestra se coloca, mediante la grúa, en la celda *PASLINK*. Una vez situada en el exterior, se realiza el acabado final, con la instalación del sistema de tolvas de extracción, y el sellado final de todas las juntas de la fachada, para asegurar un acabado definitivo y fiable. En la Figura 4.44 se muestra una serie de imágenes del proceso descrito. Una vez definida la construcción de la muestra, a continuación, se detalla la instrumentación instalada, ver Tabla 4.4. En total se colocan 34 sondas en la muestra. Al tratarse de un sistema constructivo sencillo, en la probeta se determinan tres superficies de medida y la cámara de aire, ver esquema Figura 4.43, esto simplifica en gran medida la caracterización de la muestra. En este caso, al controlar el movimiento de aire de forma mecánica, y disponer de superficies metálicas, se espera que la temperaturas de cada capa sea más homogénea en altura, por lo que la configuración de sensores es algo diferente al de los ensayos anteriores.



Figura 4.44 – Proceso de montaje final de la muestra de fachada forzada

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES		
			CAPA 1-2-3	CA	TOLVA
FV FORZADA	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	12	1
	Dif Temperatura	Termopila tipo T 10 puntas		1	
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1		1	
	Caudal aire	KIMO CP300-ALETAS DEBIMO			1
	Dif Presión	Ahlborn FD8612DPS/APS		3	

Tabla 4.4 – Sensores instalados en la probeta de fachada ventilada forzada

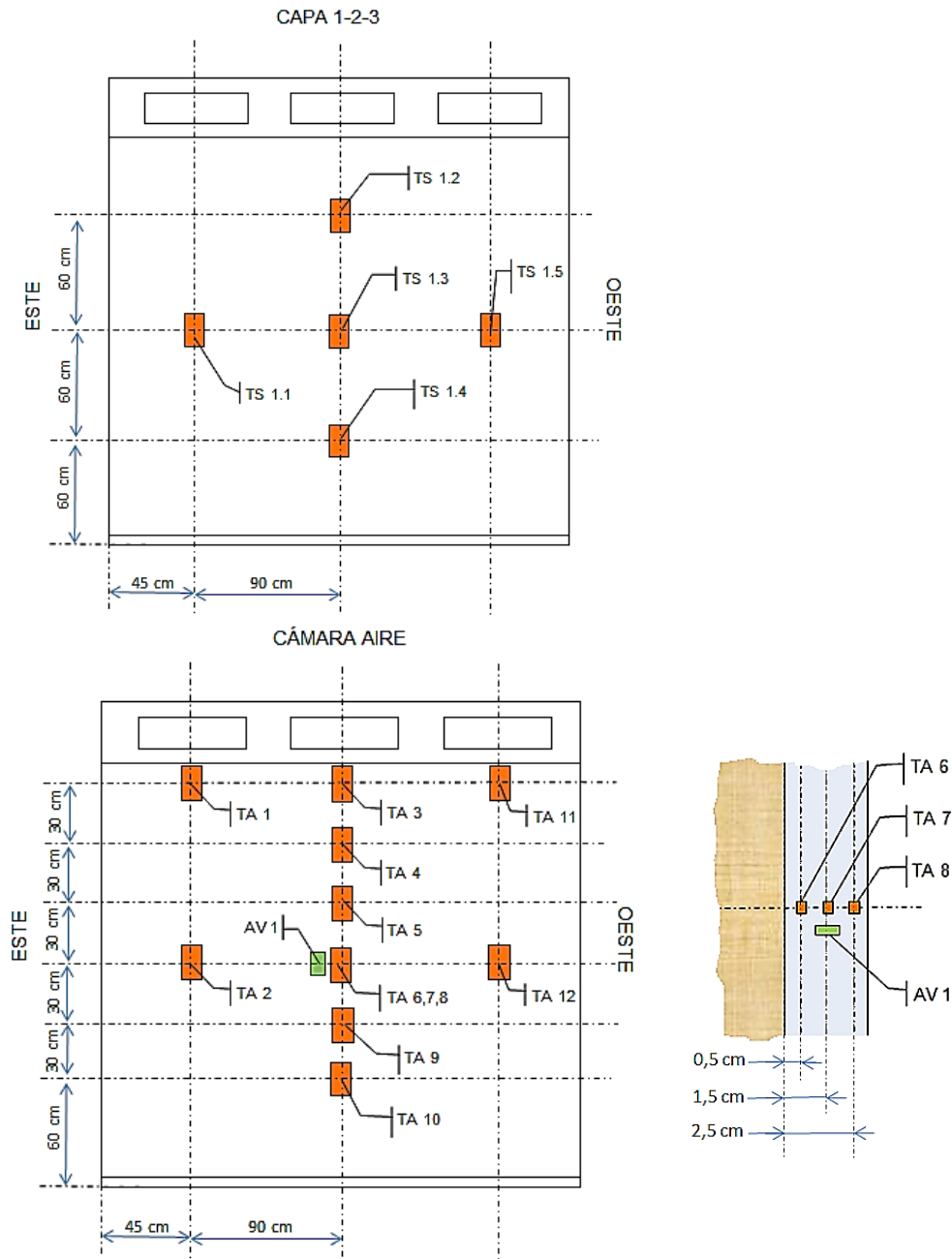


Figura 4.45 – Esquema de montaje de las sondas de temperatura en las tres capas de la muestra y en la cámara de aire

En cada capa se disponen 5 sondas de temperaturas distribuidas homogéneamente, y en el aire se aprovecha para aumentar la información de la temperatura en la cámara, instalándose un total de 12 sondas de temperatura. En la Figura 4.45 se muestra el detalle de la disposición de dichas sondas. A raíz de los resultados de los estudios anteriores, que se detallan en el siguiente capítulo, se obtiene que la forma del perfil de temperaturas, tanto en la sección transversal como en altura de la cámara ventilada es determinante para poder estimar con precisión la energía absorbida por la cortina de aire. Por tanto, en la zona central se intenta determinar experimentalmente dicho perfil, introduciendo sondas a diferente profundidad de la cámara, y se aumenta el número de puntos de medida en altura. En cuanto al resto de parámetros de caracterización, para la medida de la velocidad, como el sistema es forzado y se conoce el caudal circulante, se instala únicamente un sonda de velocidad en la altura media de la cámara ventilada, ver Figura 4.45, y se mantiene la medida del salto de temperaturas mediante la termopila, además de la medida de la caída de presión, exactamente igual que en la probeta de fachada ventilada pesada, ver detalle en la Figura 4.40. En la Figura 4.46 se muestra el proceso de instalación de las sondas indicadas durante el proceso de construcción de la probeta de fachada forzada. Una vez definidas las muestras de trabajo que componen el presente estudio, en el siguiente apartado se detallan los datos experimentales obtenidos durante los ensayos realizados en la celda PASLINK.



Figura 4.46 – Proceso de instalación de las sondas en la probeta de fachada forzada

4.2 Datos experimentales

En este apartado se recogen los principales parámetros del estudio, como las variables que reflejan las condiciones en la sala de ensayo, y los datos más representativos de la instrumentación propia de las probetas. Los datos totales, de los cuales se obtienen, se recogen en el Anexo C. Se comienza el análisis con los datos correspondientes al muro base. En un principio es la probeta más sencilla de estudio, pero por tratarse de la solución constructiva de referencia para el resto de ensayos requiere un especial detalle en su análisis y validación.

4.2.1 Muro base

Aunque en el estudio se considera como muro base de referencia la configuración sin y con aislamiento, para el análisis de los datos experimentales se separan ambos casos en dos subapartados debido a la diferencia del comportamiento de ambas muestras, como se desarrolla a continuación.

4.2.1.1 Muro base sin aislamiento

Al igual que en los estudios realizados en los ensayos anteriores de calibración y trazabilidad, primero se analizan las condiciones exteriores, posteriormente las condiciones de la sala de ensayos y finalmente los datos propios de la muestra. En la Figura 5.47 y Figura 5.48 se muestran las condiciones meteorológicas y la radiación solar, respectivamente. Se combinan días despejados con días nublados, habiéndose producido precipitaciones únicamente a lo largo de un día. La velocidad del aire delante de la muestra es reducida, no superando valores de 2 [m/s].

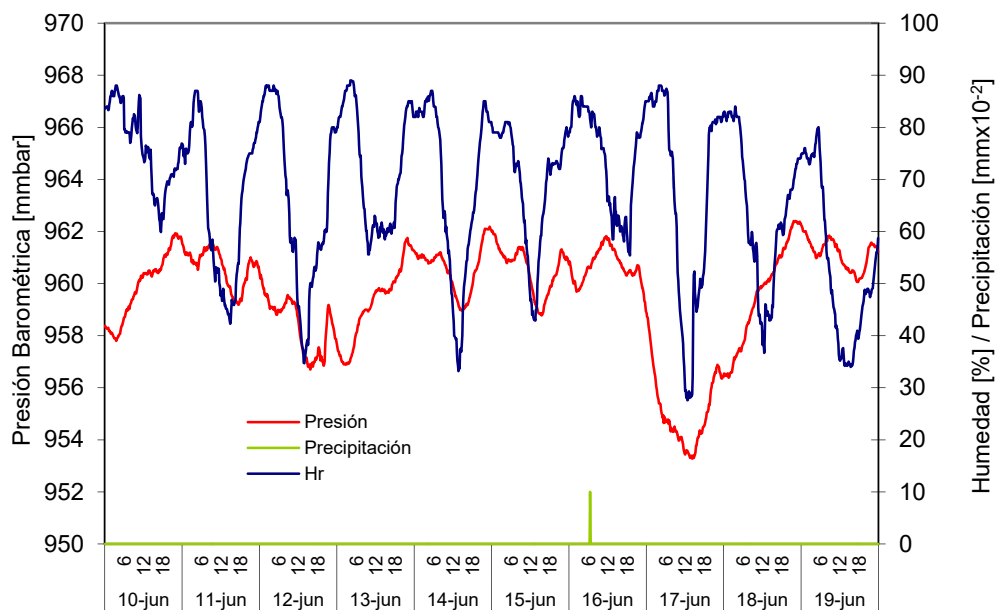


Figura 5.47 – Condiciones ambientales durante el ensayo del muro base

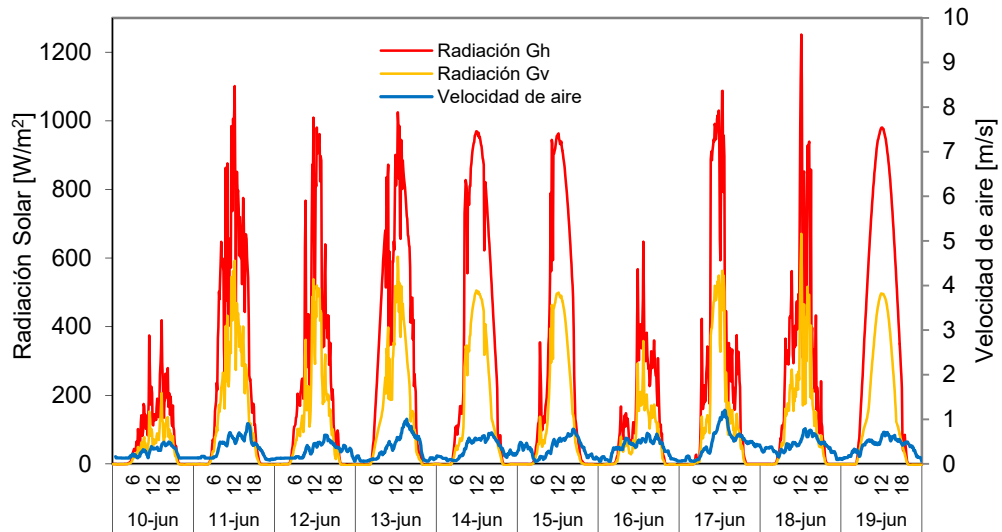


Figura 5.48 – Radiación solar y velocidad de viento durante el ensayo del muro base

En la Figura 4.49 se muestra la rutina de calentamiento y el flujo de calor intercambiado por la envolvente de la sala de ensayos. En este caso se puede observar como el flujo toma valores negativos. Esto se debe a la baja resistencia térmica de la muestra bajo ensayo. Durante los periodos de tiempo en los que no entra el sistema de calentamiento el ambiente interior de la sala de ensayos se enfría tanto que las paredes de la envolvente descargan calor. Esta situación se verifica en la evolución de las temperaturas de la sala de ensayos, como muestra la Figura 4.50.

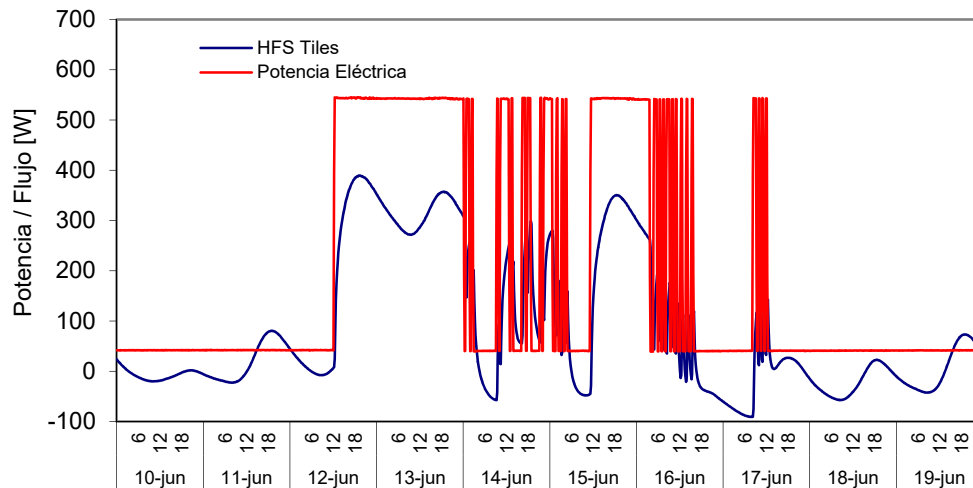


Figura 4.49 – Potencia introducida y flujo de calor de la envolvente de la sala de ensayos para el muro base

En los intervalos en los que no hay calentamiento la temperatura de la superficie de las *tiles* supera a la temperatura del aire. Este enfriamiento se consigue debido a que las temperaturas exteriores alcanzan valores bajos durante los periodos nocturnos. El salto medio de temperaturas entre ambientes es de 15,2°C. Las diferencias máximas entre las temperaturas del ambiente interior no superan los 0,5°C, máximo marcado por la línea roja discontinua de la Figura 4.51, por lo que se cumple el requisito de homogeneidad. De igual forma, las temperaturas de las superficies de la envolvente tampoco superan diferencias de más de 1°C, por lo que se puede considerar que el comportamiento de la celda durante el ensayo es correcto para el análisis de la muestra.

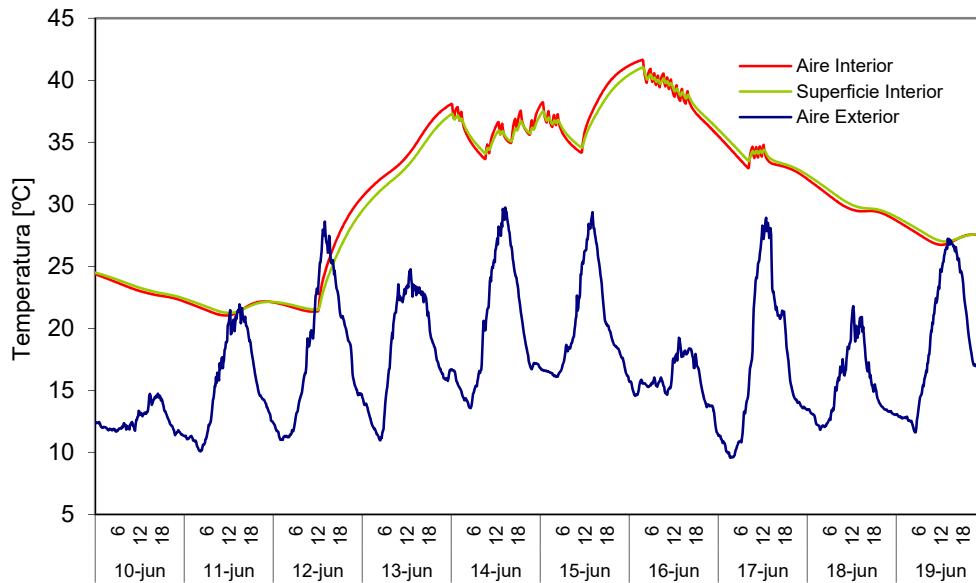


Figura 4.50 – Temperaturas de la sala de ensayos y ambiental para el muro base

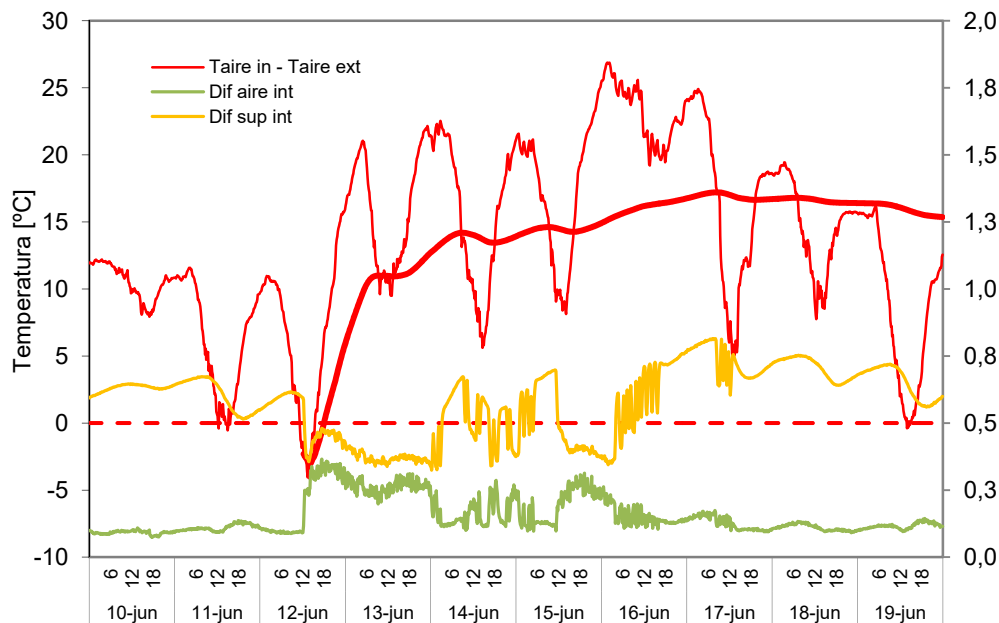


Figura 4.51 – Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para el muro base

Una vez analizada la sala de ensayos, se pasa a evaluar el comportamiento de la muestra del muro base. En la Figura 4.52 se muestran los valores medios de superficie para cada capa, junto con las diferencias máximas. Se puede ver como durante el inicio del ensayo, durante el periodo libre, la onda de temperatura evoluciona desde la capa más exterior, *capa 4*, hacia las capa interiores, hasta el inicio de la rutina de calentamiento, donde la capa interior, *capa 1*, se desacopla y sigue el comportamiento del ambiente interior. Este comportamiento permite unas mejores condiciones para el proceso de identificación. Si se analizan las diferencias entre temperaturas de la misma superficie, las diferencias medias son de $0,4^{\circ}\text{C}$ para las *capas 1 y 2*, de $0,7^{\circ}\text{C}$ para la *capa 3* y de $1,1^{\circ}\text{C}$ para la *capa 4*, por lo que se puede considerar que el comportamiento de la muestra es homogéneo y por tanto el efecto del portaprobetas es despreciable. El

comportamiento en temperaturas de la muestra se refleja en los flujos puntuales medidos, ver Figura 4.53. En los periodos libres el flujo de calor evoluciona del exterior hacia el interior, hasta el arranque de la calefacción, donde se produce el desacople del flujo interior. Los flujos medidos en las capas 2 y 3 presentan valores muy próximos, ya que están separados únicamente por la resistencia que aporta la cámara de aire de 5 [cm] de la muestra, la cual aporta una resistencia térmica pequeña y una inercia térmica despreciable, pero su medida diferenciada es interesante de cara a poder realizar una identificación de parámetros más fiable de cada una de las hojas de fábrica de ladrillo, por separado, y contrastar el resultado con el valor obtenido del estudio del conjunto de la muestra, como se puede ver en el apartado 5.1.1 del Capítulo 5.

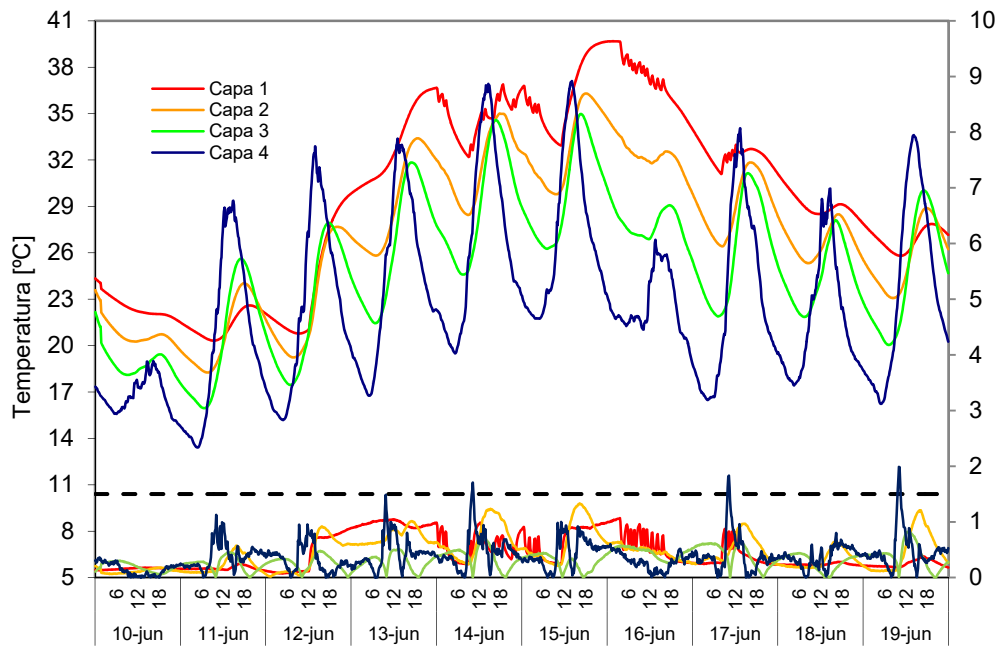


Figura 4.52 – Temperaturas en la probeta de muro base

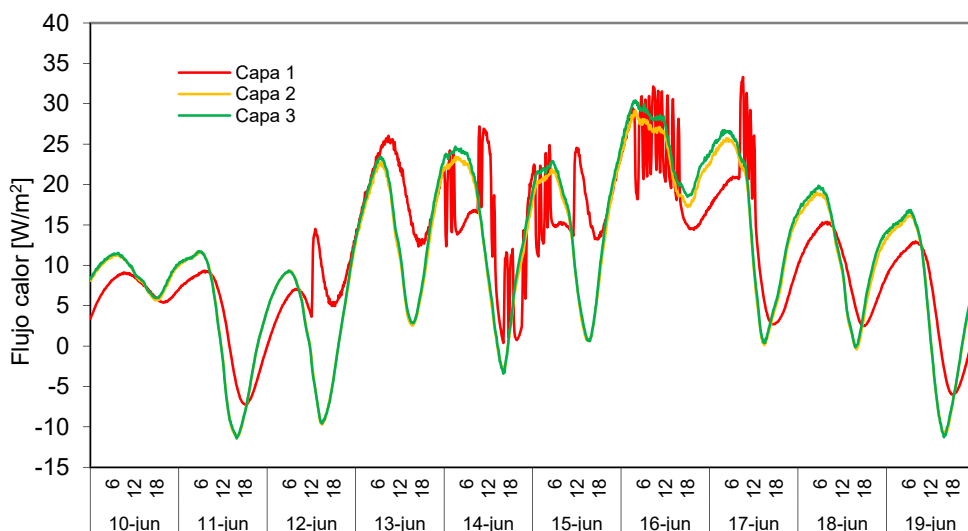


Figura 4.53 – Flujos de calor puntuales medidos en la zona central de la muestra para las capas interiores

En la Figura 4.54 se muestran los flujos en la superficie interior para la zona central y la zona perimetral. Se puede ver como los valores de flujo son muy próximos, por lo que en esta muestra los efectos de borde debidos al portamuestras son reducidos. El flujo

medio en la zona central es de $11,8 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y de $12,5 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y $11,2 \text{ [W/m}^2\text{]}$ para la zona de esquina y para la de borde, respectivamente. Esto implica unas diferencias del 5,9% y 4,7%, próximas a la propia incertidumbre de medida de los fluxímetros. A diferencia de lo que sucedía con el muro de calibración y el muro opaco del IQ-Test, ambos muy aislantes, donde los efectos de borde tenían una repercusión muy importante en los flujos intercambiados por la muestra. Una vez ensayado el muro base se lleva a cabo la colocación de la capa de aislamiento por el exterior y se repite el ensayo. Este muro sirve como referencia respecto a los muros con sistemas de fachada ventilada. A continuación se muestran los resultados experimentales de este segundo ensayo.

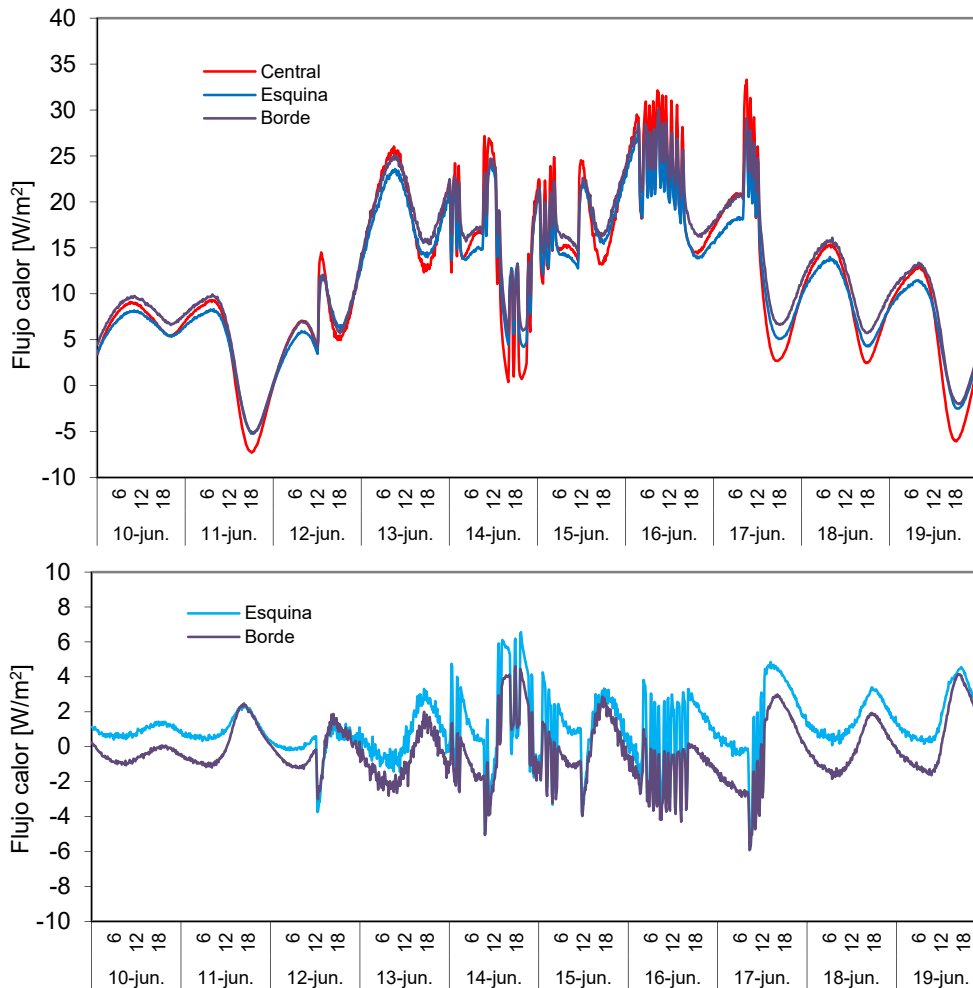


Figura 4.54 – Flujos superficiales en la cara interior, capa 1

4.2.1.2 Muro base con aislamiento

Debido a la carga de trabajo de la celda EGUZKI, el ensayo del muro con aislamiento se llevó a cabo nueve meses después. En la Figura 4.55 se muestran las condiciones ambientales del ensayo. Como la colocación del aislante y el revestimiento de mortero exterior es una construcción húmeda, además coincide con un día de precipitaciones, se decide realizar un primer escalón de calentamiento para secar la muestra y acondicionarla de forma adecuada. En la Figura 4.56 se puede ver como durante el periodo central del ensayo se dan días despejados con importante incidencia solar, y al

tratarse del periodo primaveral, la componente de radiación sobre el plano vertical es del mismo orden que la componente sobre el plano horizontal. En la Figura 4.57 se puede ver la rutina de ensayo con el escalón inicial y los ROLBS que se introducen posteriormente. En este caso el flujo neto de la envolvente es positivo durante todo el periodo de ensayo ya que el muro presenta el suficiente aislamiento. Como se esperaban unas condiciones ambientales cálidas se reduce la potencia nominal del calefactor a 320 [W], respecto a los 550 [W] empleados en el ensayo del muro base sin aislamiento.

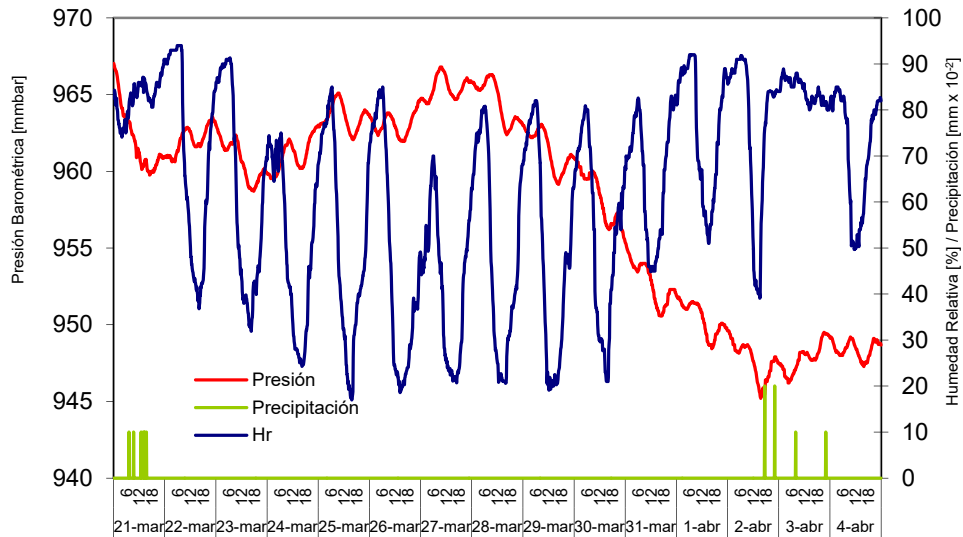


Figura 4.55 – Condiciones ambientales durante el ensayo del muro base con aislamiento

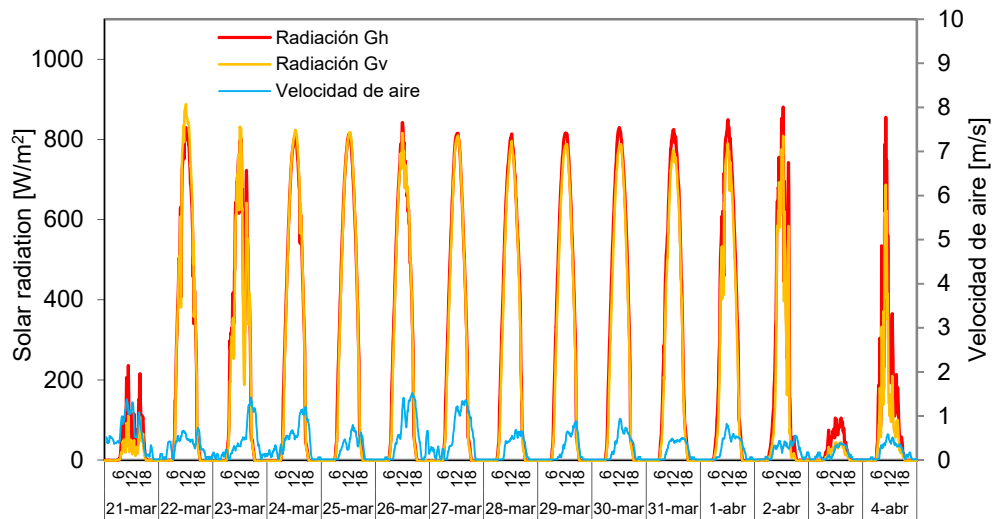


Figura 4.56 – Radiación solar y velocidad de viento frente a la muestra ensayo del muro base con aislamiento

En la Figura 4.58 y en la Figura 4.59 se puede ver la evolución de las temperaturas de la sala de ensayo y del ambiente exterior. El salto medio entre ambos es de 18°C, manteniéndose una homogeneidad de las temperaturas del aire en la sala de ensayo claramente por debajo de los 0,5°C. Las temperaturas de superficie también presentan un comportamiento muy homogéneo, mejorando las condiciones respecto al ensayo del muro base sin aislamiento.

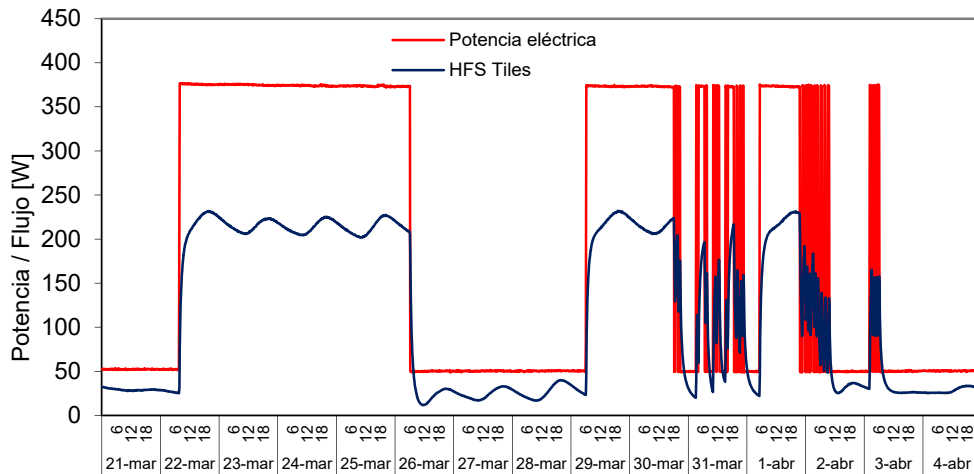


Figura 4.57 – Rutina de calentamiento y flujo de la envuelta durante el ensayo del muro base con aislamiento

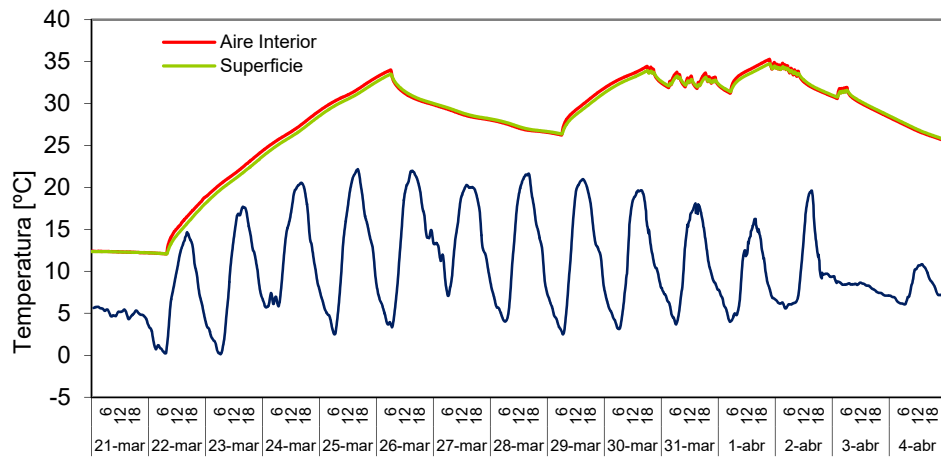


Figura 4.58 – Temperaturas de la sala de ensayo y del ambiente exterior para el muro base con aislamiento

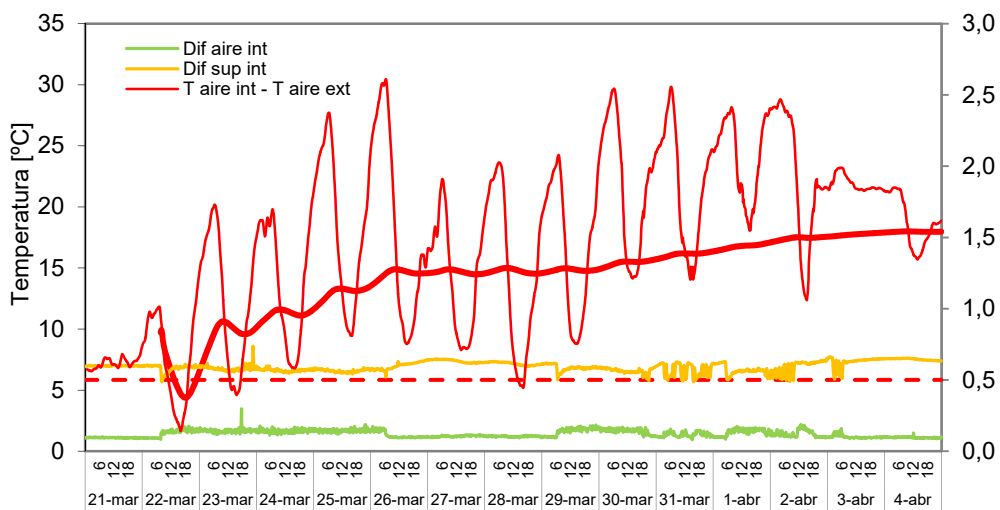


Figura 4.59 – Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para el muro base con aislamiento

En la Figura 4.60 se muestran las temperaturas en cada capa de la muestra, junto con la diferencia máxima. Se puede apreciar cómo debido a la radiación solar incidente sobre el muro la temperatura de la superficie exterior supera en gran medida las temperaturas de la cara interior de la muestra. También se puede apreciar el efecto del aislamiento en la evolución de la temperatura de la *capa 4*, superficie interior del aislante, que presenta los ciclos día-noche que se observan en la *capa 5*, superficie exterior del aislante, más atenuados. También se puede observar cómo, junto con las variaciones diarias externas, la temperatura de la *capa 4* sigue la tendencia de la temperatura de la sala de ensayo y a la rutina de calentamiento que se impone en la misma. Esta configuración de ensayo es la que permite caracterizar con gran precisión las propiedades térmicas de la muestra maximizando la potencialidad de las herramientas de identificación de parámetros, que de otra forma serían más complejas de aplicar. En cuanto a la homogeneidad de las temperaturas en la superficie de cada capa, se comprueba que las diferencias máximas respecto a los valores medios es pequeña, inferior a $0,5^{\circ}\text{C}$ en todas las capas internas, y solo alcanza valores puntuales algo elevados en la superficie exterior en los momentos de máxima incidencia solar, pero aun así aceptables como para considerar despreciable el efecto del portamuestras.

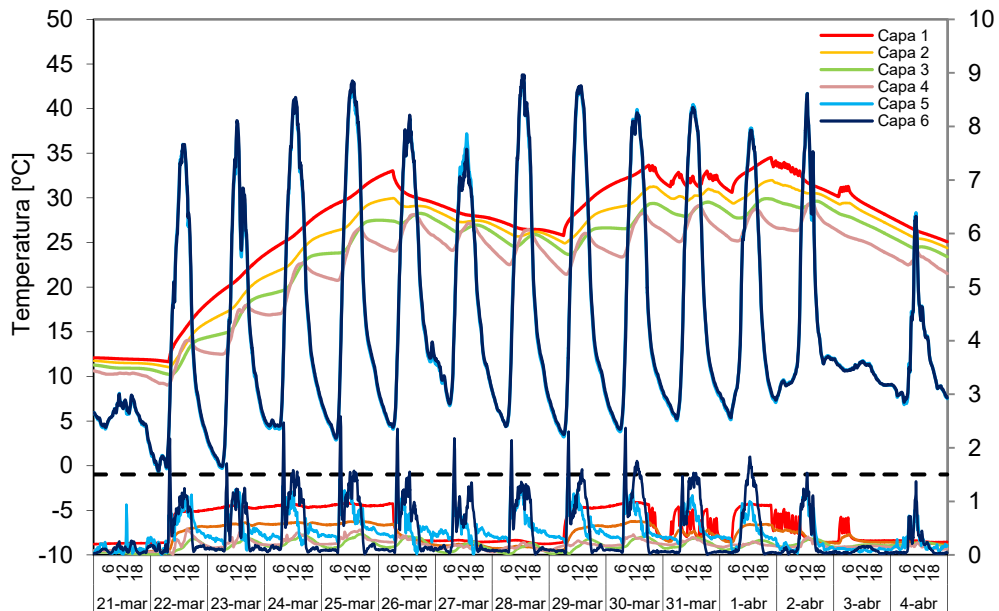


Figura 4.60 – Temperatura media en cada capa del muro base con aislamiento

Otro detalle interesante a tener en cuenta es el comportamiento de las temperaturas de la *capa 6*, superficie exterior, y de la *capa 5*, tras el revestimiento de mortero. El revestimiento exterior consiste en una capa fina de $0,5$ [cm] de mortero con la malla de refuerzo, de forma que no aportan una resistencia térmica apreciable y presenta una inercia térmica reducida, por lo que la medida de la temperatura entre ambas caras tiene poca relevancia a la hora de caracterizar el comportamiento térmico de la muestra. Pero permite, sin embargo, disponer de una herramienta para valorar el posible error en la medida de la temperatura superficial exterior de la muestra debido al efecto de la radiación solar sobre las propias sondas gracias a estas mismas características del revestimiento. Y el resultado es positivo, en la Figura 4.61 se muestra la diferencia entre la temperatura media de ambas capas. Se puede ver que las desviaciones son reducidas, rodeando al cero, y con un valor medio inferior a $0,3^{\circ}\text{C}$. Por lo que se puede considerar que se está caracterizando adecuadamente la temperatura superficial de la probeta, lo que mejora en gran medida la determinación del intercambio térmico convección-radiación de la muestra con el ambiente exterior.

Aunque la diferencia media es pequeña, el error de la medida de temperatura superficial con incidencia de radiación se estima en $\pm 1^\circ\text{C}$, para contemplar los picos puntuales que se producen en los instantes de máxima diferencia, de forma que en este rango de incertidumbre se contiene el 95% de los puntos medidos



Figura 4.61 – Diferencia de temperatura media entre la *capa 6*, superficie externa, y la *capa 5*, tras el revestimiento de mortero, en la muestra de muro con aislante

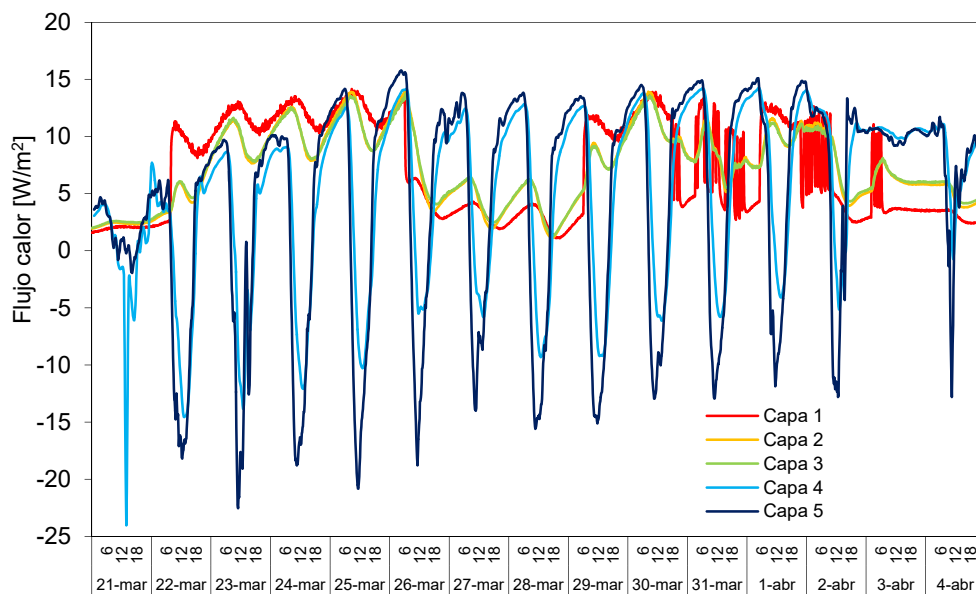


Figura 4.62 – Flujos de calor en la zona central de la muestra con aislamiento para cada una de las capas

Una vez analizadas las temperaturas se pasa a evaluar el comportamiento de las medidas de flujos de calor, realizadas en las diferentes capas de la muestra. Los valores obtenidos, para la zona central de la probeta se muestran en la Figura 4.62. En este caso, se puede apreciar como la capa que marca una diferenciación en el comportamiento de los flujos de calor es el tabique exterior de ladrillo hueco doble, al ser el principal componente que aporta inercia térmica a la solución de fachada. Se puede observar la reducción en el flujo de calor producido por la capa de aislamiento, a comparar los flúxímetros de la *capa 4*, cara interior del aislante, y de la *capa 5*, cara exterior. Pero ambos siguen la evolución del ciclo diario de radiación solar, y tras la hoja de ladrillo, sin embargo, los flujos de calor siguen la excitación generada por la rutina de calentamiento.

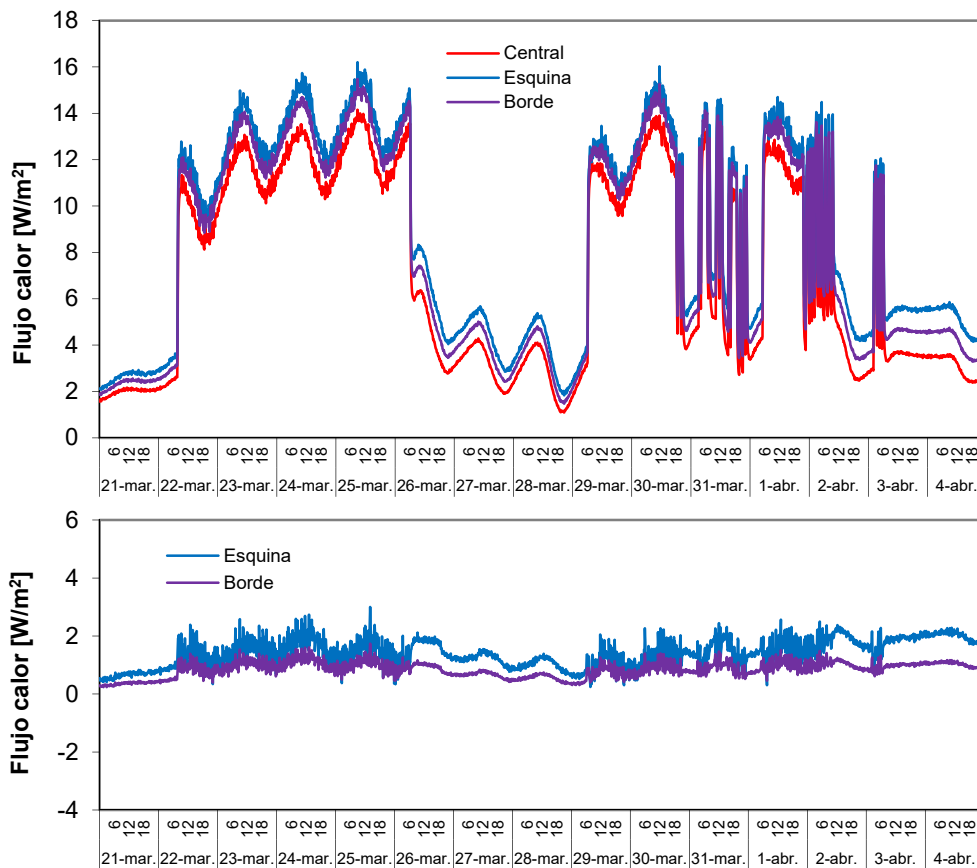


Figura 4.63 – Flujos superficiales en la cara interior, *capa 1*, para la muestra con aislamiento

Se puede apreciar como las condiciones iniciales de la muestra, debido al aumento de la humedad, por la colocación del aislamiento y del revestimiento exterior, afectan a los flujos de calor. Durante el primer día de ensayos se aprecia unos picos de flujo de calor en la *capa 4* debidos a al movimiento de masa de vapor por difusión. Pero gracias al escalón de calentamiento aplicado se puede observar como la muestra se acondiciona, equilibrando el contenido de humedad de cada capa, y la evolución de los flujos de calor es estable. Este efecto es necesario tenerlo en cuenta a la hora de realizar la identificación de parámetros y tener especial cuidado de verificar la estabilidad y fiabilidad de los resultados. En cuanto a los efectos de borde en la muestra del muro base con aislamiento, en la Figura 4.63 se muestra el flujo en la zona central y los flujos en las zonas de borde de la cara interior de la probeta. El flujo medio en la zona central es de $7,1 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y de $8,5 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y $8,0 \text{ [W/m}^2\text{]}$ en la zona de esquina y en la de borde superior, respectivamente, lo que representa un aumento del flujo del 20% y del 12%. Estas discrepancias son más altas que en el muro sin aislamiento, como era de esperar. Su efecto real se determina en el proceso de identificación de parámetros. Una vez evaluado el muro base, en sus dos versiones, se pasa a evaluar el comportamiento de los sistemas con fachadas ventiladas, que se describe a continuación.

4.2.2 Fachada ventilada ligera

En el caso de los ensayos experimentales sobre las muestras de fachada ventilada, debido a su complejidad, se dividen en dos periodos. Un primer periodo de ensayo cuyos datos se emplean para la definición del modelo matemático del

comportamiento de la cámara ventilada, y un segundo periodo de ensayo que se emplea como validación y contraste. A continuación se muestran los datos obtenidos durante el primer periodo de ensayo para la muestra de fachada ventilada ligera, los datos correspondientes al segundo periodo se muestran en el Anexo C.

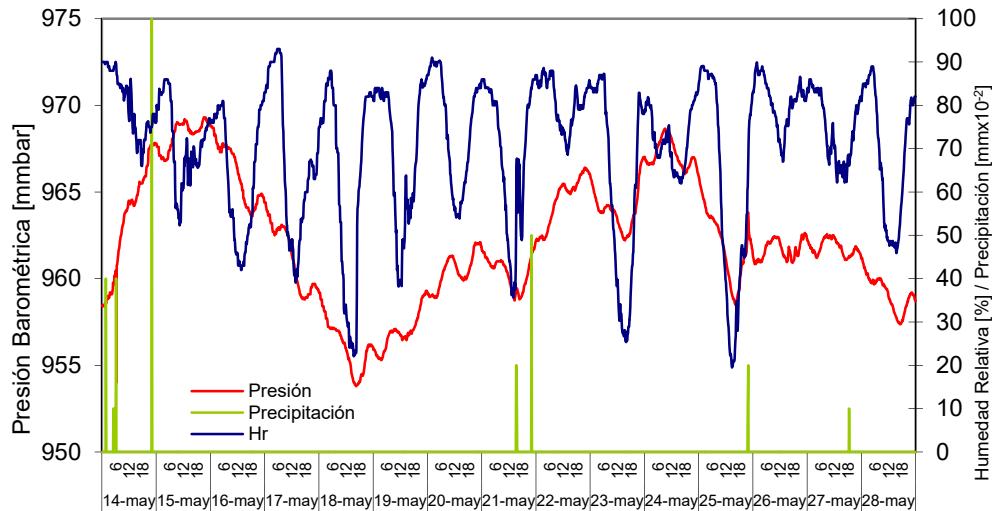


Figura 4.64 – Condiciones ambientales en el ensayo de la fachada ventilada ligera periodo de modelado

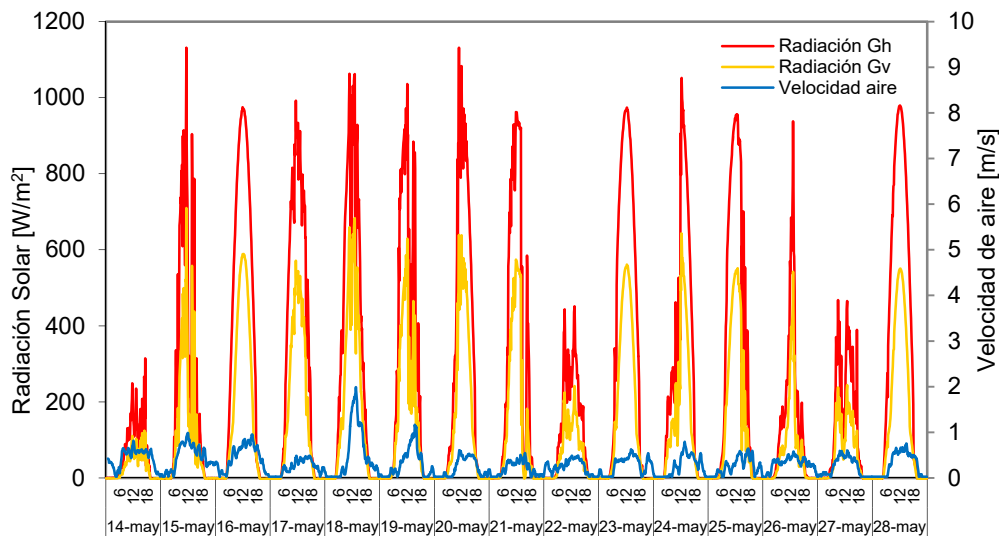


Figura 4.65 – Radiación solar y velocidad de viento durante el ensayo de la fachada ventilada ligera

En la Figura 4.64 se recogen las condiciones ambientales durante la ejecución del ensayo. Se puede apreciar que durante el intervalo de ensayo la variabilidad de las condiciones ambientales es muy amplia, con presencia de precipitaciones importantes. En la Figura 4.65 se recoge la radiación solar y la velocidad de viento a la altura de la muestra. Estas dos variables son fundamentales para el estudio del comportamiento de la fachada ventilada ya que son los motores del movimiento de aire dentro de la cámara ventilada. Por un lado se tiene que la radiación solar incidente sobre la hoja exterior es la causante del movimiento por convección natural, y principal componente a analizar en el estudio. Por otro lado, en los momentos de altas velocidades de viento, al componente de flotación se sumará el efecto de empuje por velocidad de aire exterior, componente a descartar del estudio. Por ejemplo, se puede apreciar que el día

18 de mayo, se producen velocidades de viento mayores que la media, lo que puede causar un comportamiento diferente, y por tanto requiere ser eliminado de la fase de modelado matemático, como se verá más adelante.

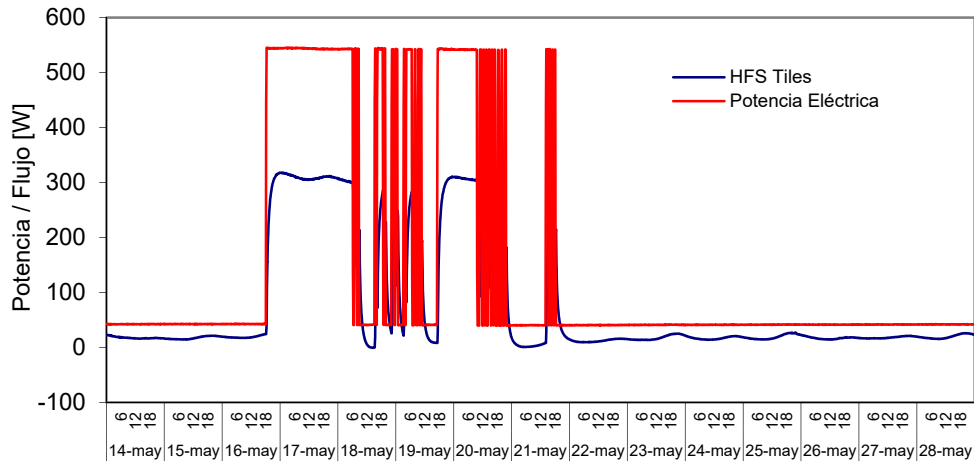


Figura 4.66 – Potencia introducida y flujo de calor de la envolvente de la sala de ensayos para la fachada ventilada ligera

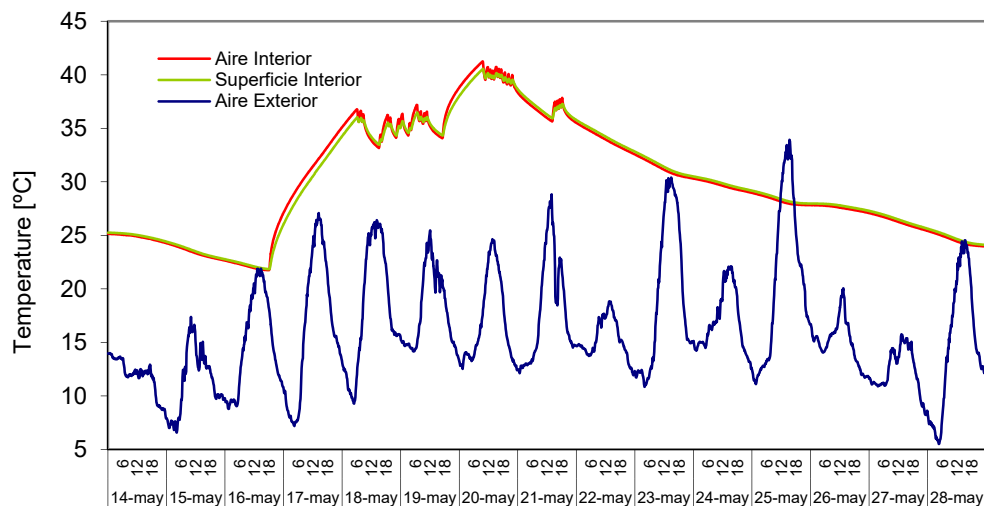


Figura 4.67 – Temperaturas de la sala de ensayos y ambiental para la fachada ventilada ligera

En la Figura 4.66 se muestra la rutina de calentamiento y el flujo de la envolvente. Aunque la mayor parte del tiempo el sentido del flujo de calor de la envolvente es positivo, hay que recordar que este signo corresponde a la condición de flujo saliente, en ciertos momento de parada del calefactor se invierte el sentido del flujo, generando flujo entrante. Si se compara con el muro aislado, en el cual el flujo era siempre saliente, y teniendo en cuenta que el grado de aislamiento es el mismo en ambas probetas, esto indica un efecto de refrigeración del sistema de fachada ventilada, efecto que se analiza posteriormente en la fase de modelado, *Capítulo 5*, y se cuantifica en el *Capítulo 6*, en el análisis de las demandas de cada solución constructiva a escala de edificio. En la Figura 4.67 se puede observar la evolución de las temperaturas de la sala de ensayos y del ambiente exterior. En la Figura 4.68 se puede ver que el salto de temperaturas entre ambientes alcanza un valor medio de 17,9°C, para el periodo de calentamiento, y se mantiene por encima de los 15°C durante el periodo libre final. También se puede apreciar como la homogeneidad de las temperaturas de aire en la

sala de ensayos es muy alta y como las diferencias máximas en las temperaturas de superficie de la envolvente son inferiores a 1°C en todo momento.

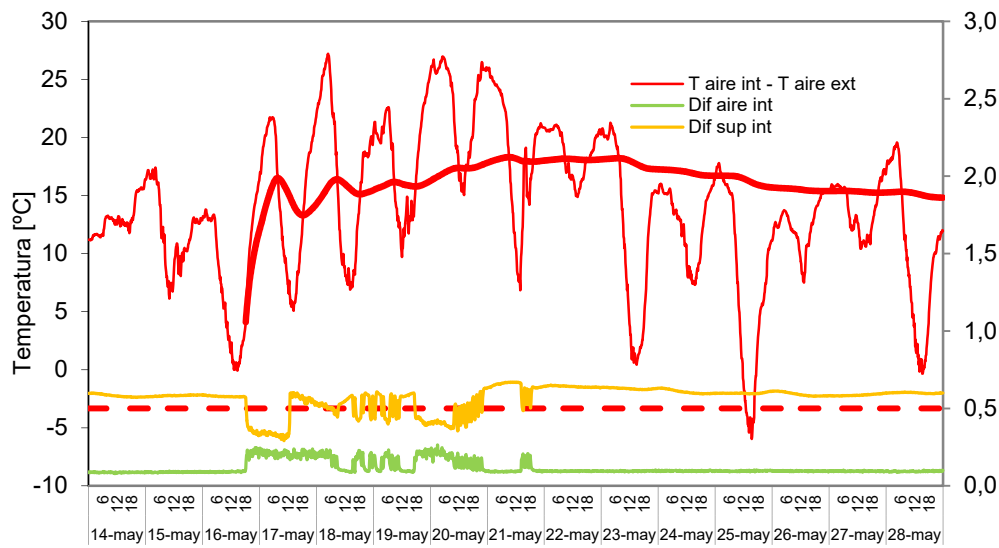


Figura 4.68 – Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada ligera

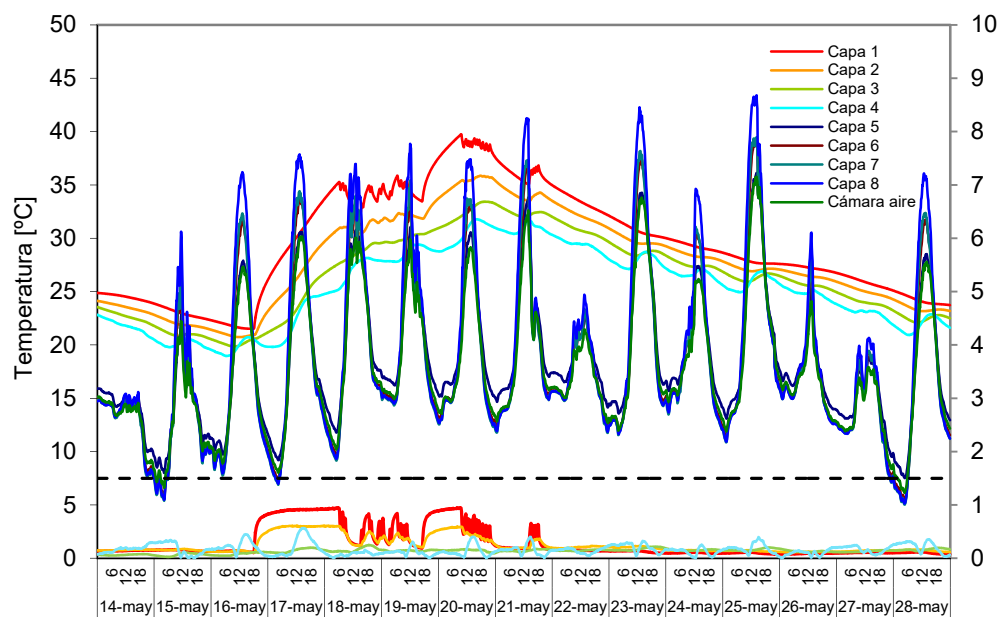


Figura 4.69 – Temperaturas en la probeta de fachada ventilada ligera

En cuanto al comportamiento de la muestra, en la Figura 4.69 se recogen las temperaturas medias de cada capa. Se aprecia que la homogeneidad de las temperaturas superficiales de las capas internas es alta. No se repite este análisis para las superficies de la cámara ventilada ya que no tiene sentido, debido a que el movimiento de aire generará un gradiente de temperaturas en dichas superficies, más adelante se realiza un análisis más detallado del comportamiento de estas superficies y del aire junto con la velocidad del mismo y los flujos puntuales medidos durante el ensayo. En cuanto a los flujos de calor en la muestra, en la Figura 4.70 se recogen las señales de los fluxímetros instalados en la zona central de las principales capas de la fachada. De las curvas de flujo de calor se aprecia un aspecto importante en el proceso de transmisión de calor en la cámara ventilada. Se puede observar como la hoja

exterior es el foco de calor principal durante las horas de radiación solar, transmitiendo calor al aire de la cámara ventilada por convección y a la superficie del aislante por radiación. Este comportamiento se analiza con más detalle en el apartado de modelado de la fachada ventilada ligera.

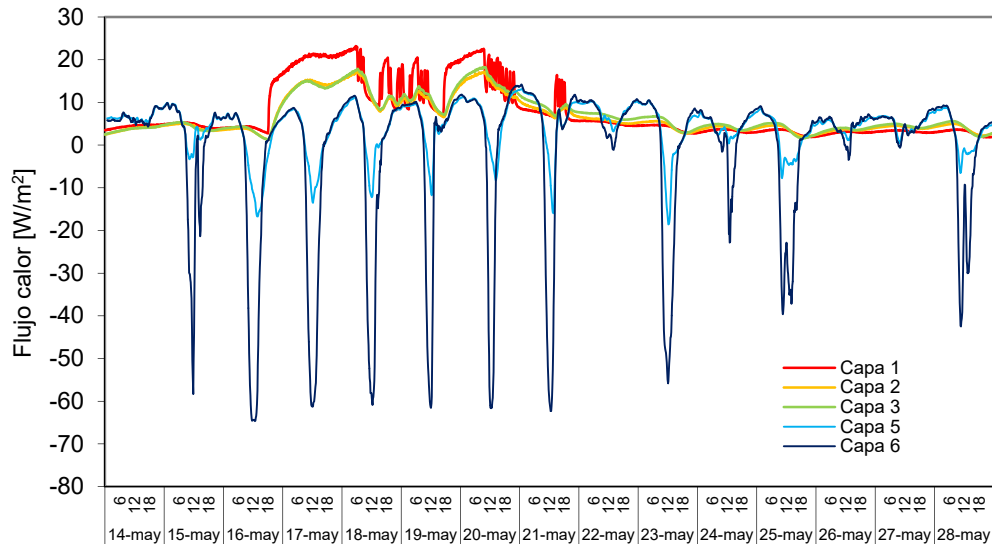


Figura 4.70 – Flujos de calor puntuales medidos en la zona central de la fachada ventilada ligera para cada una de las capas más representativas

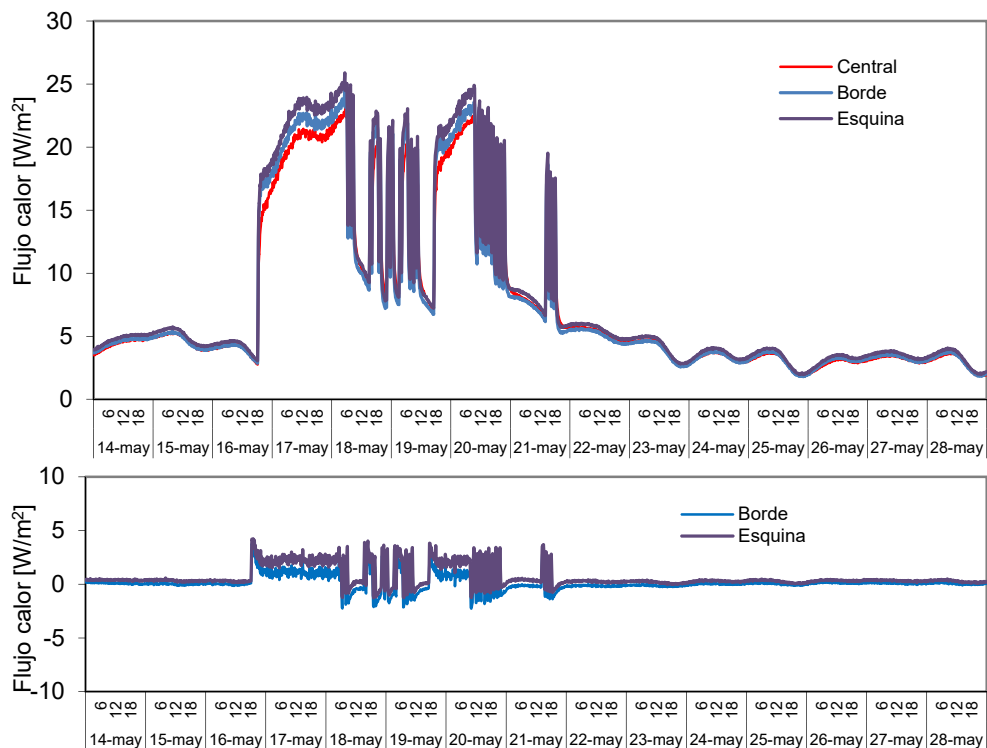


Figura 4.71 – Flujos superficiales en la cara interior, capa 1, para la muestra de fachada ventilada ligera

Antes de pasar a analizar el comportamiento de la cámara ventilada con más detalle, es necesario verificar los efectos de borde mediante las lecturas de los fluxímetros instalados en la superficie interior de la muestra, ver Figura 4.71. El flujo medio en la zona central de la muestra es de $7,70 \text{ [W/m}^2\text{]}$, en la zona de borde de $7,85 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y en la zona de esquina de $8,35 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Esto implica un 2% y 8,6% respectivamente. Los

efectos de borde en la muestra de fachada ventilada ligera son superiores a los obtenidos en el muro base, como era de esperar al tener aislamiento, pero son inferiores a los obtenidos durante el ensayo del muro base con aislamiento.

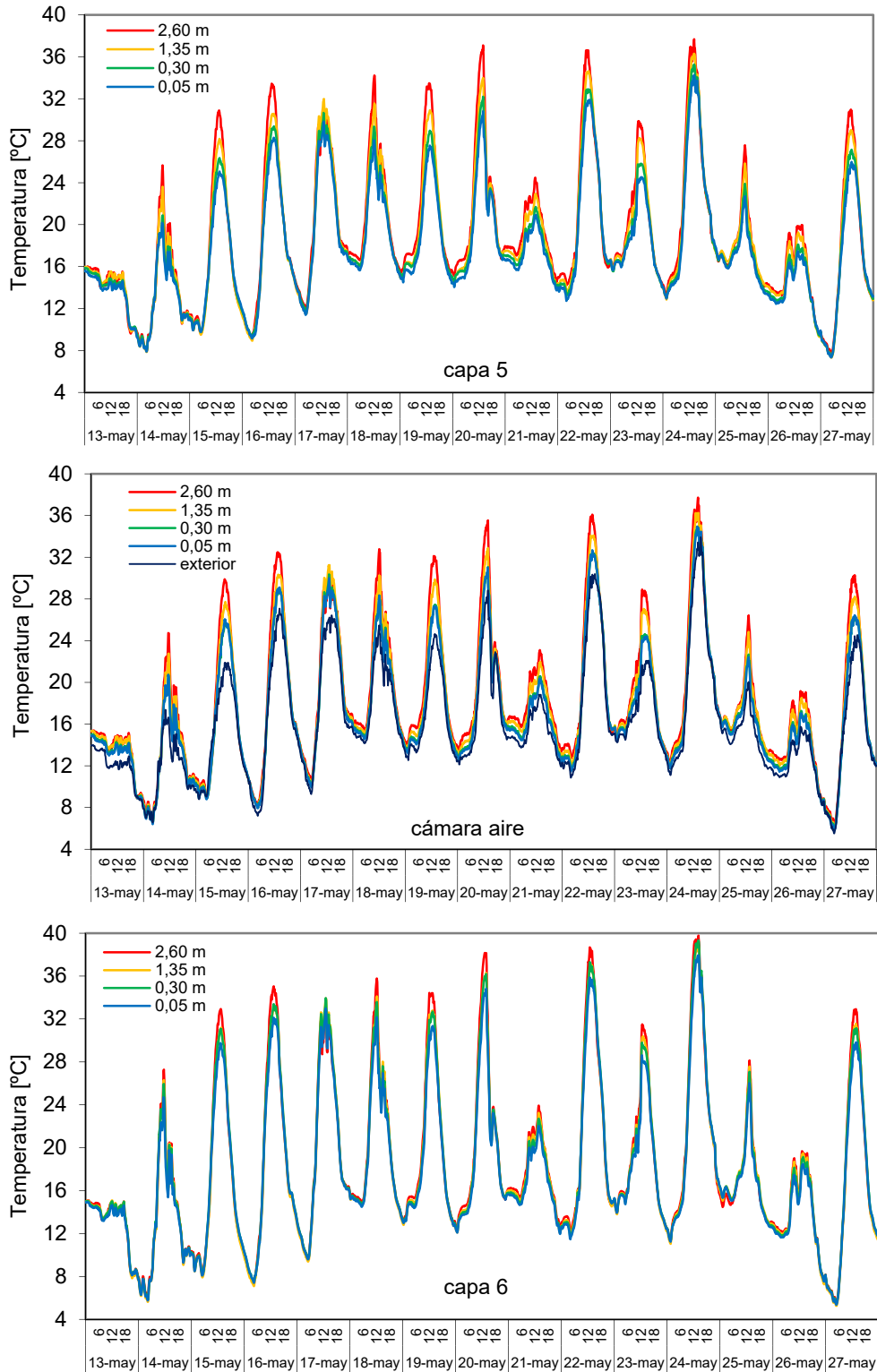


Figura 4.72 – Temperaturas en función de la altura en el eje central de la cámara ventilada

Una vez evaluados los parámetros básicos del ensayo, se puede pasar a analizar el comportamiento de la cámara ventilada, principal componente de interés del ensayo, ya que es poca la documentación científica de ensayos a escala real del comportamiento de este tipo de soluciones constructivas con las prestaciones de precisión y trazabilidad del ensayo *PASLINK*^[62,66]. En la Figura 4.72 se recoge la evolución de las temperaturas en función de la altura para el eje central de la muestra, en cada una de las superficies que conforman la cámara ventilada y en el aire. Se puede observar el gradiente de temperaturas que se genera en las dos superficies y en el aire durante los periodos de calentamiento por radiación solar, y como las temperaturas se aproximan entre sí durante las horas nocturnas. En la Figura 4.73 se recogen las diferencias de temperatura entre el punto inferior de la cámara de aire, situado a 0,05 [m] de altura, y el punto más alto, situado a 2,60 [m] de altura. Se puede ver como en la superficie interior de la cámara, correspondiente al aislante, se generan los mayores gradientes de temperatura, que alcanzan valores del orden de los 7°C. Sin embargo, en la superficie exterior de cierre, al tratarse de un material conductor, y disponer de poco inercia térmica, las temperaturas presentan mayor homogeneidad, no superando diferencias mayores de los 4°C.

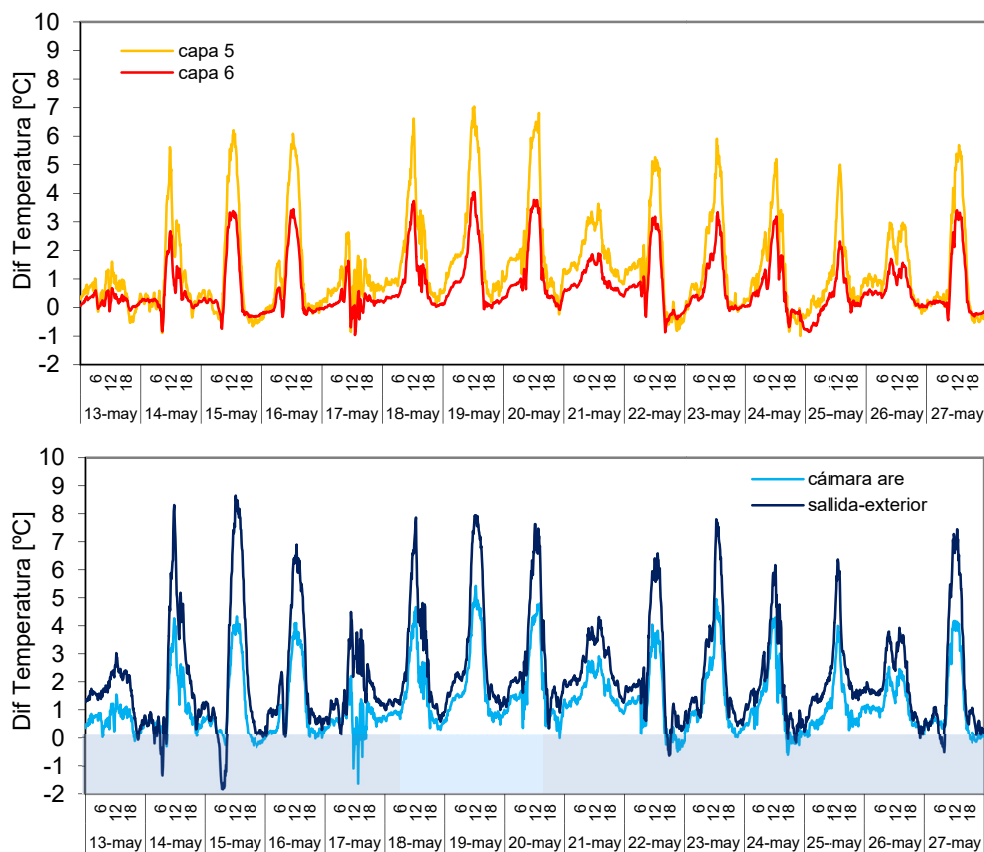


Figura 4.73 – Diferencias de temperatura entre la parte inferior y superior para las dos superficies y el aire de la cámara ventilada

Estas variaciones son representativas de cara a plantear los modelos de caracterización del movimiento convectivo del aire dentro de la cámara ventilada. En la mayoría de estudios^[150] una de las principales hipótesis de trabajo consiste en considerar temperaturas constantes en las superficies que configuran la cámara de aire. Esta hipótesis simplifica en gran medida los cálculos, pero puede generar una estimación de los flujos de calor intercambiados que difiera de los valores reales. Por tanto, este aspecto es una de los parámetros que se analiza posteriormente en el

apartado de modelado de la fachada ventilada. En cuanto al aire de la cámara ventilada, en la gráfica inferior de la Figura 4.73 se muestra también el salto de temperaturas entre el punto superior y el ambiente exterior. Esta segunda curva es la que se emplea para determinar el calor absorbido por el caudal de aire en movimiento. El salto máximo de temperatura que se obtiene es del orden de los 8°C. Se puede apreciar como el calentamiento del aire según se desplaza a lo largo de la fachada es de unos 4°C, la mitad del salto total, produciéndose la otra mitad del calentamiento de forma directa en la entrada de la cámara ventilada. Otro aspecto importante que se puede apreciar en las curvas de salto de temperatura son los periodos en los que el sentido del flujo de aire se invierte, pasando de un flujo ascendente a un flujo descendente. En la gráfica inferior de la Figura 4.73 se muestra, mediante una zona sombreada los puntos en los que el salto de temperatura se invierte, situación que se produce generalmente durante el periodo del amanecer. Estos periodos de inversión del sentido del movimiento de aire pueden repercutir en el comportamiento energético de la fachada. Este aspecto se analiza con más detalla en el apartado de modelado de la fachada ventilada, *Capítulo 5*.

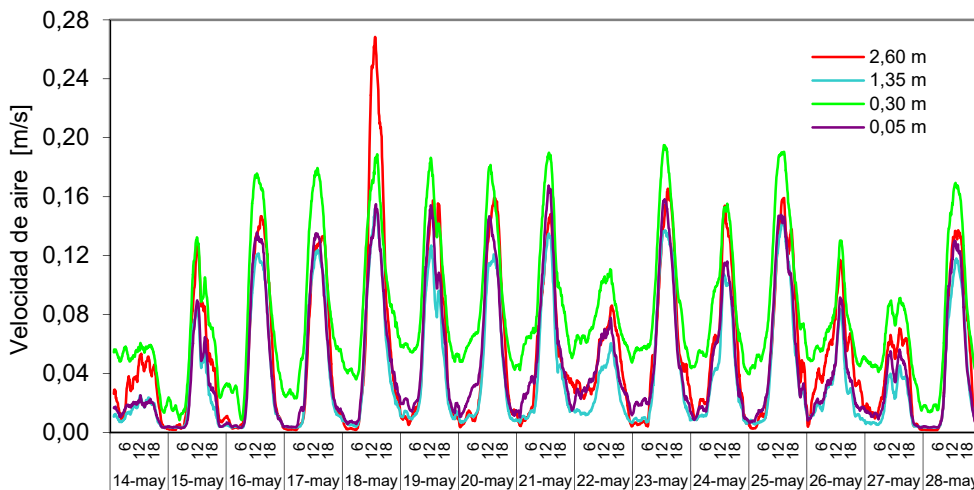


Figura 4.74 – Velocidades de aire en la cámara ventilada para el eje central en función de la altura

Junto con las temperaturas, el otro parámetro de mayor importancia para la adecuada caracterización del proceso de convección dentro de la cámara ventilada es la velocidad del aire. En la Figura 4.74 se muestran las medidas obtenidas en el eje central para las diferentes alturas. Las velocidades máximas que se alcanzan son relativamente pequeñas, del orden de los 0,15 [m/s], y se puede observar claramente el proceso de flotación en los puntos de máxima incidencia solar sobre la fachada. Hay que destacar los valores medidos en el punto situado a 30 [cm] de altura, donde se registran velocidades superiores a las medidas en el resto de alturas. Del estudio mediante *CFD* de la muestra, ya se obtiene que en esta zona se producen turbulencias debido al efecto de la entrada del aire a la cámara ventilada, lo que puede generar unos perfiles irregulares de velocidad en la sección de la misma. Esta situación, unida a que la medida de velocidad es puntual puede explicar este aumento de la velocidad en dicho punto. Más adelante, en la fase de modelado, se analiza con más detalle este fenómeno. Un punto importante en el proceso de estudio es el efecto de la velocidad de aire exterior en el movimiento dentro de la cámara ventilada. En la Figura 4.74 se puede apreciar claramente como el día correspondiente al 18 de mayo se obtiene un comportamiento anómalo respecto al resto de días, con una punta de velocidad en la zona de salida. En la Figura 4.75 se muestran las velocidades de aire exterior registradas por la estación meteorológica, situada a 10 [m] de altura, y mediante el anemómetro situado frente a la muestra, a 2 [m] de altura, para un día tipo, el 16 de mayo, y para el día 18 de mayo.

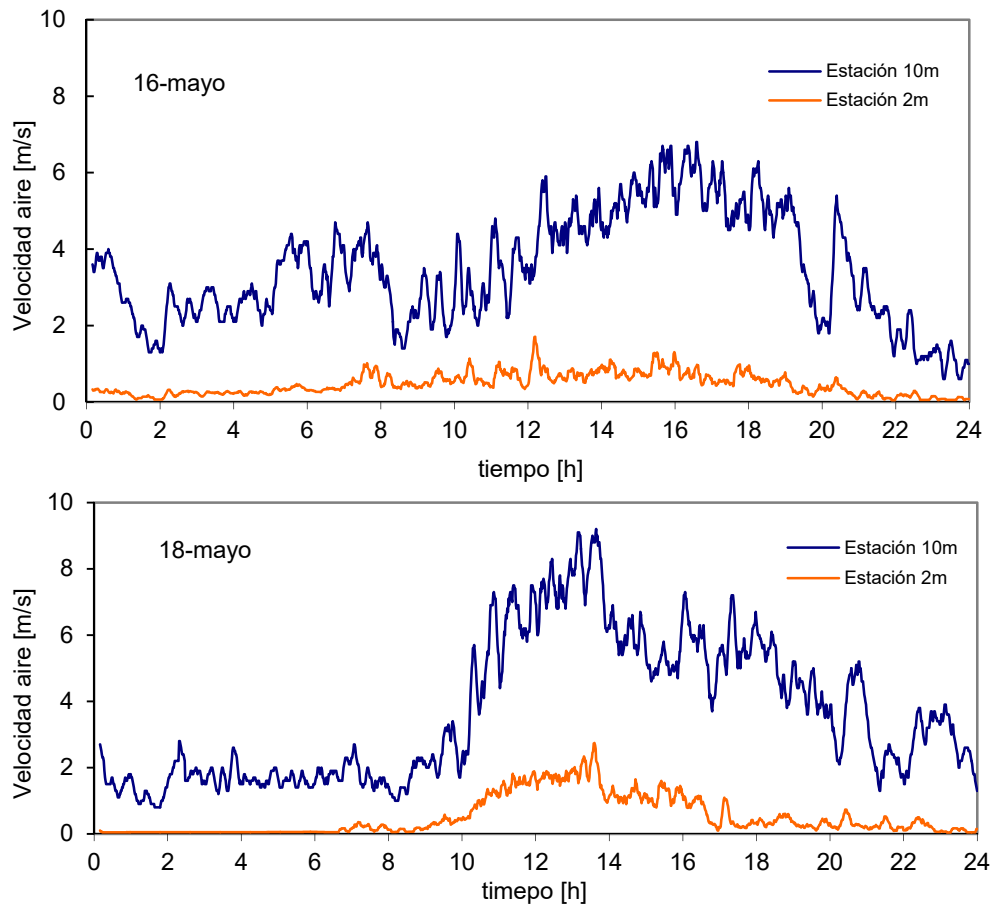


Figura 4.75 – Velocidades de aire exterior durante el 16 de mayo, un día tipo sin efecto de viento, y para el 18 de mayo, donde se detecta efecto de viento

Se puede observar como el día 18 a partir de las 10 [h] se produce un aumento de la velocidad de aire exterior, alcanzando valores máximos del orden de los 10 [m/s], frente al día 16 en el que la velocidad de viento es, más o menos, homogénea a lo largo del todo el día, con valores máximos que no superan los 6 [m/s]. También se puede observar como el anemómetro situado frente a la muestra registra velocidades muy inferiores, debido a que la celda *EGUZKI* está protegida del viento en su ubicación. Por esta situación, la muestra está menos sometida a altas velocidades de viento, no superando los 4 [m/s], pero se puede apreciar como el efecto del viento se traslada en cierta medida, a las condiciones de la probeta bajo ensayo. A parte de la intensidad de viento, el otro parámetro que afecta es la dirección de viento. En la Figura 4.76 se muestra la intensidad de viento en función de la dirección del mismo. En esta gráfica, la separación de cada punto respecto al origen representa el módulo de la velocidad en cada instante, y el punto se ubica en el cuadrante correspondiente a la dirección de viento en ese mismo instante. En la Figura 4.77 se recoge la dirección de viento a lo largo del tiempo, de forma que los puntos cercanos al origen corresponden a las horas iniciales del día, y según avanza el tiempo, los puntos se disponen en espiral, con sentido anti horario, a lo largo del gráfico en función del cuadrante en el que se registra la dirección del viento. De esta forma se conoce la dirección predominante en cada instante del día. Se puede apreciar cómo no sólo se produce un aumento de la velocidad de viento, sino que además se da con una dirección predominante sureste. Teniendo en cuenta que la celda *EGUZKI* tiene una orientación sur, estas características de viento afectan directamente en el comportamiento de la muestra de fachada ventilada, ya que se genera una situación de convección mixta, donde se suma al

efecto de flotación por temperatura, convección natural, el empuje del viento, convección forzada.

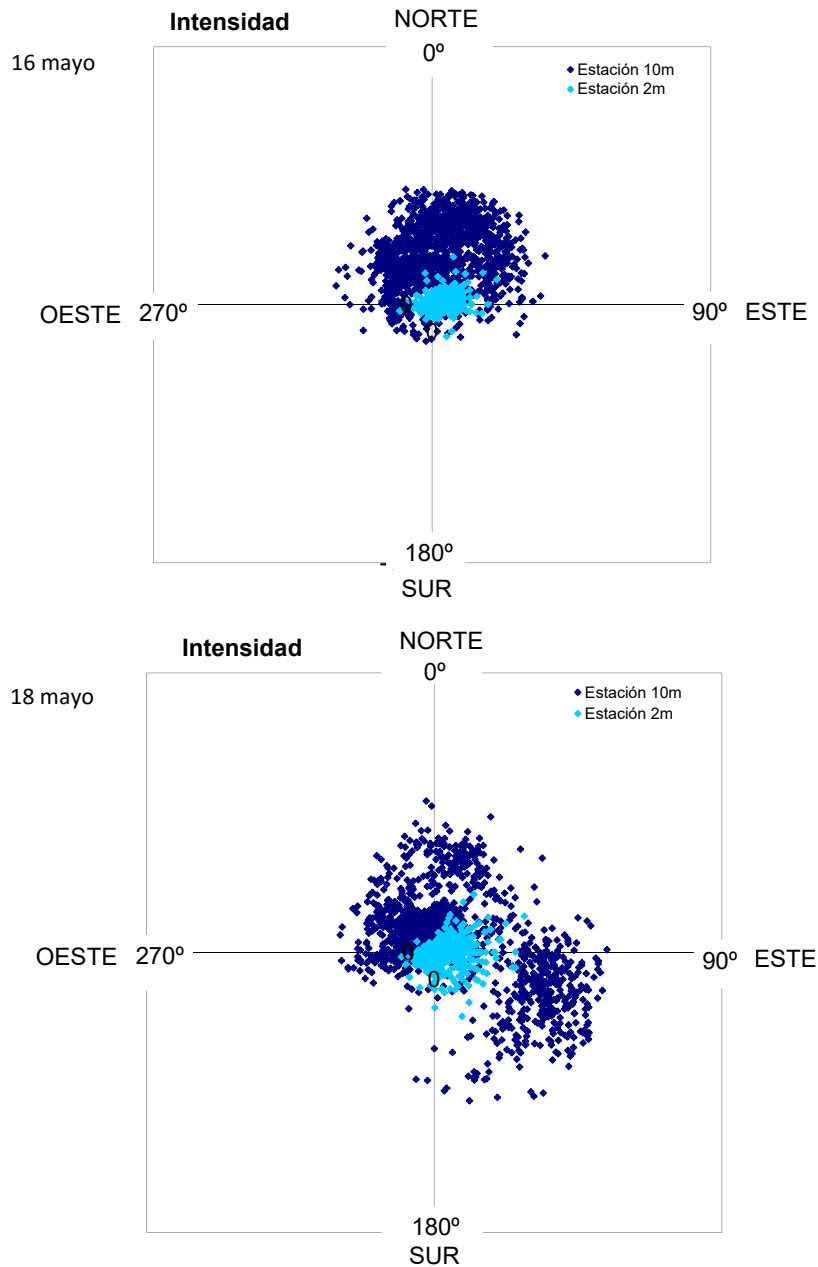


Figura 4.76 – Intensidad y dirección de viento en la estación meteorológica, 10[m], frente a la muestra, 2[m]

Sin embargo, para el día 16, la dirección de viento predominante es norte, por lo que la muestra se ve totalmente apantallada. Esta es la situación usual durante el desarrollo de los ensayos. Se puede apreciar como a partir de las 14h del día 18 de mayo, aunque se mantiene una velocidad de viento alta, la dirección pasa a ser norte, de nuevo, y como las velocidades registradas en la cámara ventilada vuelven a presentar el patrón de convección natural. Por tanto, en el análisis de los modelos de convección no se han tenido en cuenta estos periodos de medida en los que se dan situaciones similares, ya que afectan en gran medida a los parámetros de estudio, pues se estaría mezclando

procesos de convección, y el objetivo de esta primera parte del estudio es la caracterización del mecanismo de convección natural.

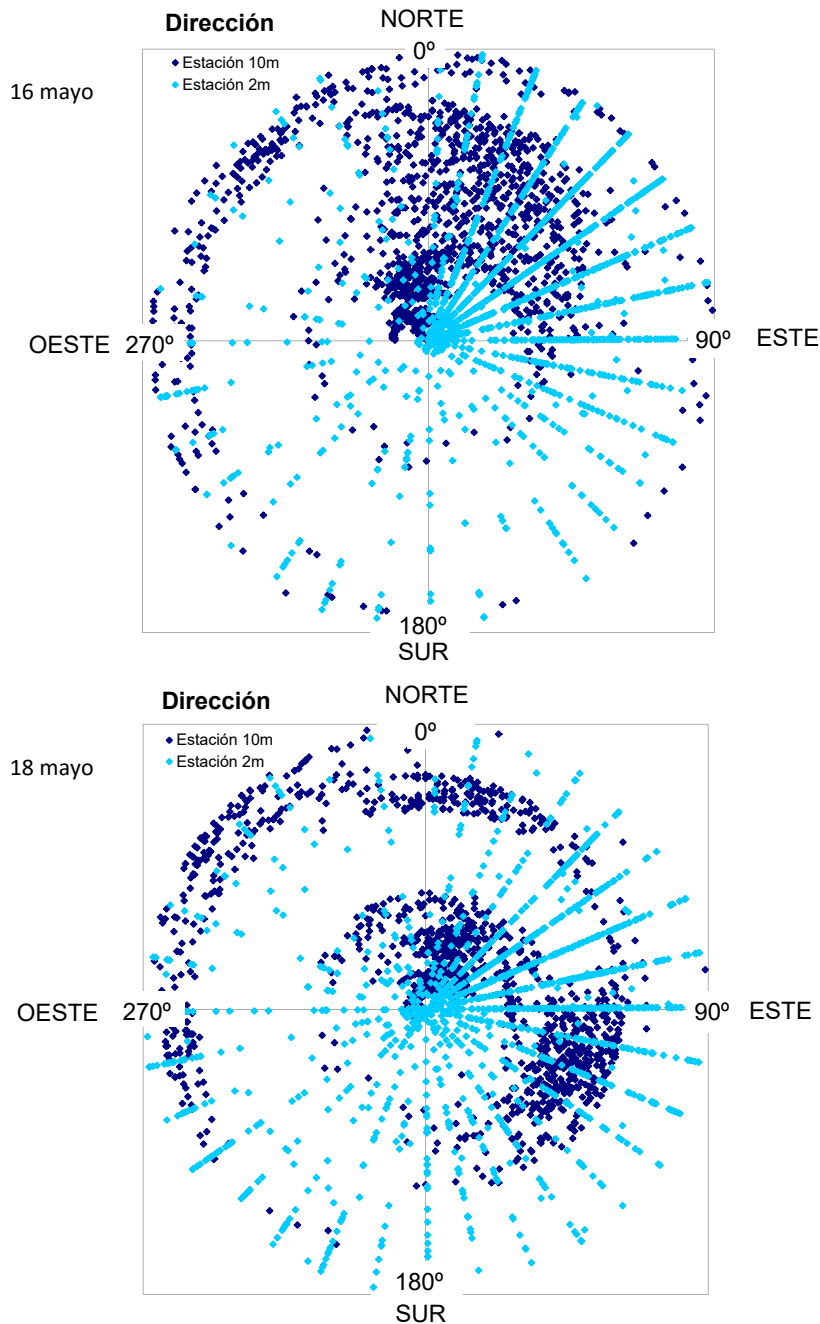


Figura 4.77 – Dirección de viento en función del tiempo medida en la estación meteorológica, 10[m], y frente a la muestra, 2[m]

Como datos complementarios, ya se ha indicado que se registran los flujos de calor puntuales en las superficies de la cámara ventilada, aunque estas medidas requieren un análisis detallado, permiten obtener una información de contraste de gran interés. En la Figura 4.78 se muestran los valores obtenidos. En cuanto al criterio de signos, se mantiene el empleado para la medida del flujo de calor de las *tiles* en la envolvente de la sala de ensayos, positivo cuando es saliente y negativo cuando el flujo de calor es de entrada. Se puede observar claramente como cuando existe radiación solar la

superficie exterior de la fachada ventilada, *capa 6*, es el foco principal de calor. Esta superficie es la que transmite calor tanto al aire de la cámara, por convección, como a la superficie exterior del aislamiento por radiación, *capa 5*. Esto se aprecia en que el flujo medido sobre la superficie del aislante también es de sentido de entrada. Y al igual que las velocidades y temperaturas, los flujos de calor van evolucionando con la altura de la cámara ventilada. Para analizar con más detalle el comportamiento de la fachada ventilada ligera, se toma un día tipo, en concreto el día 16 de mayo. Se estudia el desarrollo a lo largo del tiempo de las variables planteadas anteriormente, y se evalúa el comportamiento del aire dentro de la cámara en función de las condiciones ambientales de temperatura y radiación solar.

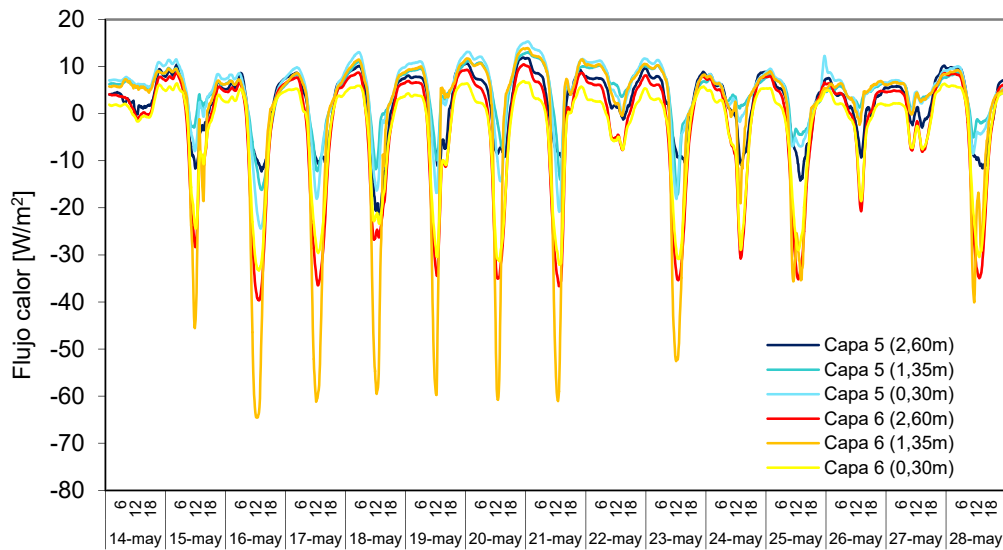


Figura 4.78 – Flujos de calor puntuales medidos en las superficies que conforman la cámara ventilada para el eje central en función de la altura

En la Figura 4.79 y en la Figura 4.80 se muestran la evolución de las temperaturas de las superficies que conforman la cámara ventilada, *capa 6* que se corresponde con la superficie que pertenece a la placa ligera de cemento, y la *capa 5* que corresponde a la superficie exterior del aislante. En la Figura 4.81 se muestra la evolución de la temperatura del aire de la cámara ventilada. En la gráfica superior de este conjunto de figuras se muestra la temperatura registrada por cada sensor situado a lo largo del eje central de la muestra. Y en las imágenes inferiores se muestra la superficie de evolución de la temperatura a lo largo del tiempo, lo que permite obtener una idea más clara de la evolución del comportamiento de la cámara ventilada. Se puede observar como cuando se inicia el proceso de convección natural, durante las horas de incidencia solar, los perfiles de temperatura se separan con la altura. En el caso de la placa de cemento, al ser un material muy conductor y poco inercial, el gradiente de temperaturas es pequeño, siendo su valor máximo de 3,5°C. Se puede ver como el efecto de la entrada de aire, en la parte inferior, desaparece rápidamente, y la temperatura presenta una evolución continua en la mayor parte de la superficie. Sí se aprecia un pequeño aumento del gradiente de temperatura cerca de la salida, pero de pequeña magnitud. Algo muy diferente sucede en la superficie del aislante, sobre la que se producen los mayores gradientes de temperatura, alcanzándose una diferencia máxima de 6,3°C. El efecto de la entrada sigue afectando en menos de medio metro de altura, pero en el resto de la superficie la variación de temperaturas es representativa. Este gradiente afecta en gran medida a la hora de definir las temperaturas para calcular los números adimensionales en el estudio del proceso de convección. Este aspecto se analiza en el apartado 5.2.3.1 del Capítulo 5.

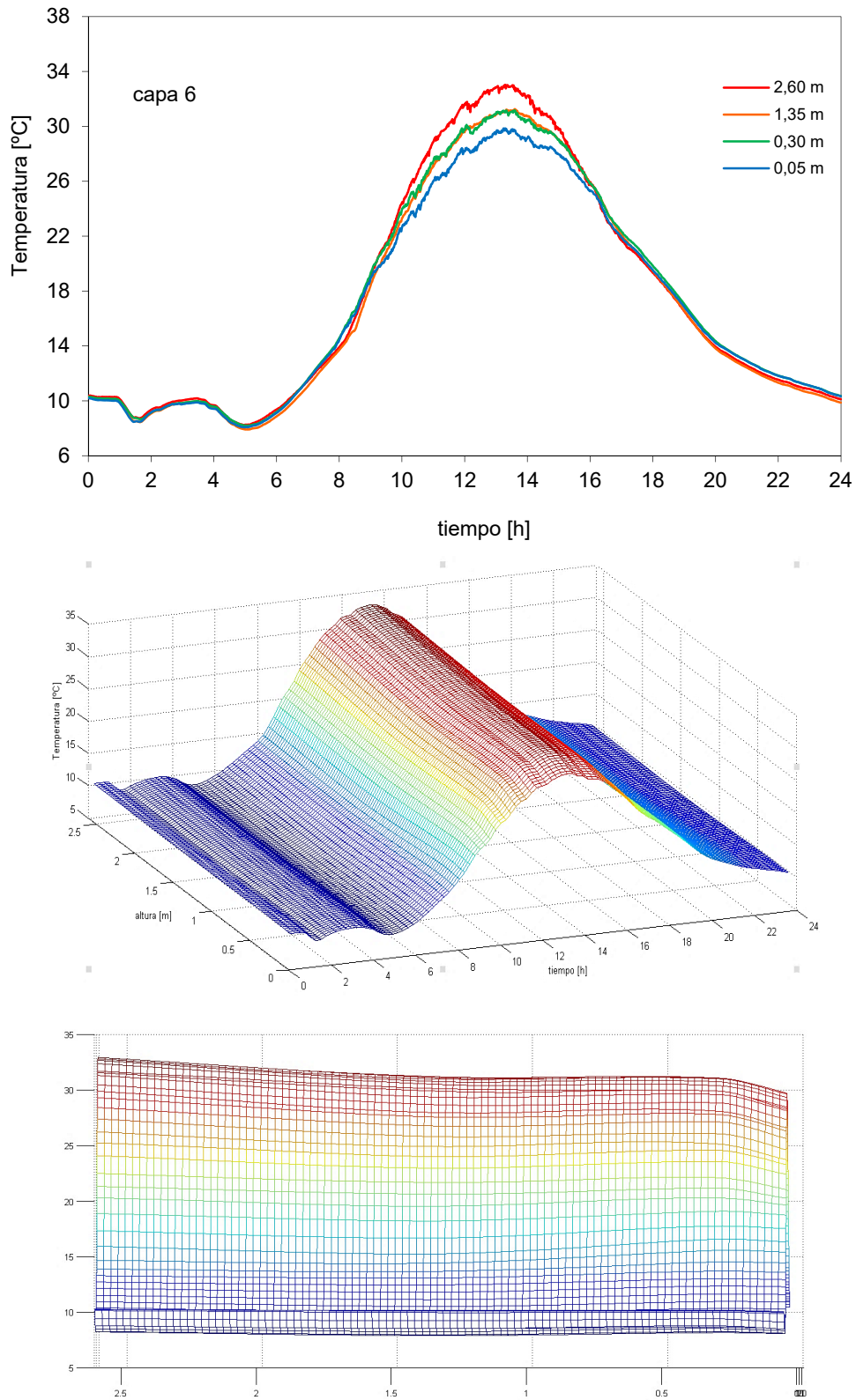


Figura 4.79 – Temperatura en la superficie exterior, *capa 6*, de la cámara ventilada

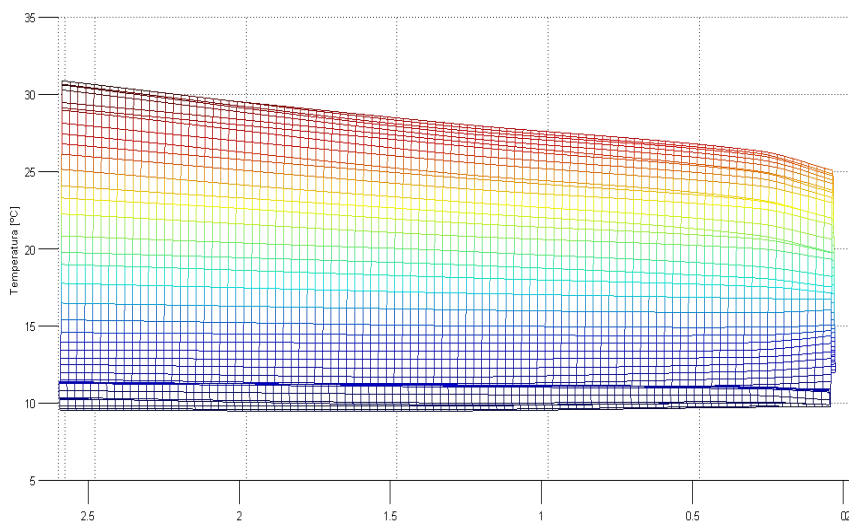
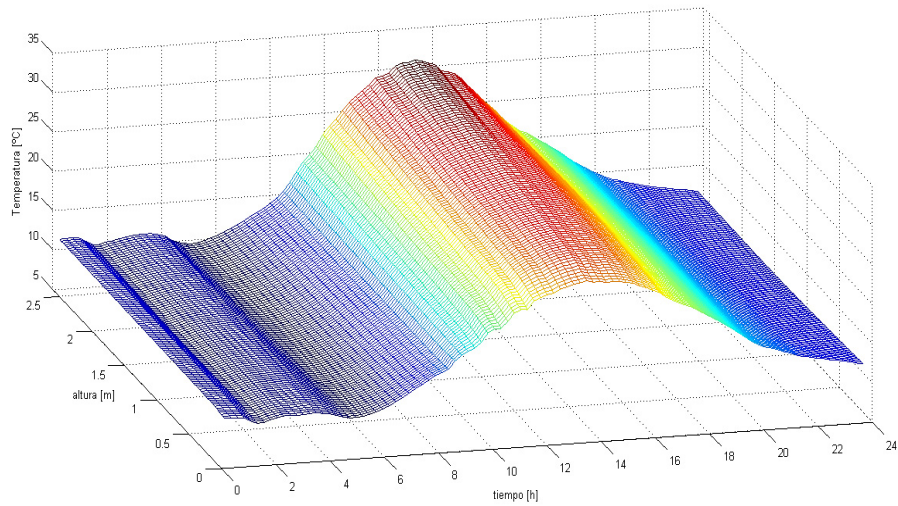
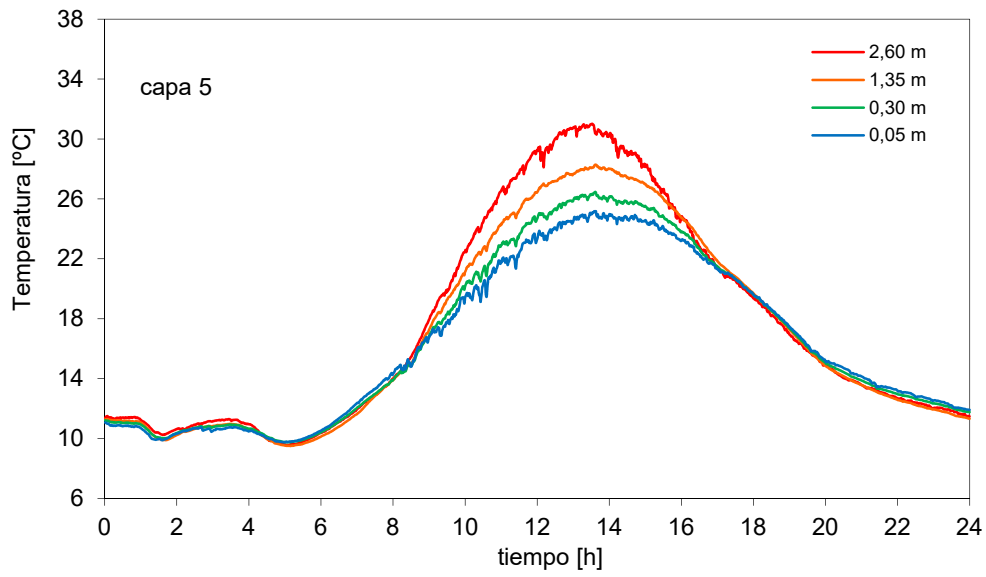


Figura 4.80 – Temperatura en la superficie interior, capa 5, de la cámara ventilada

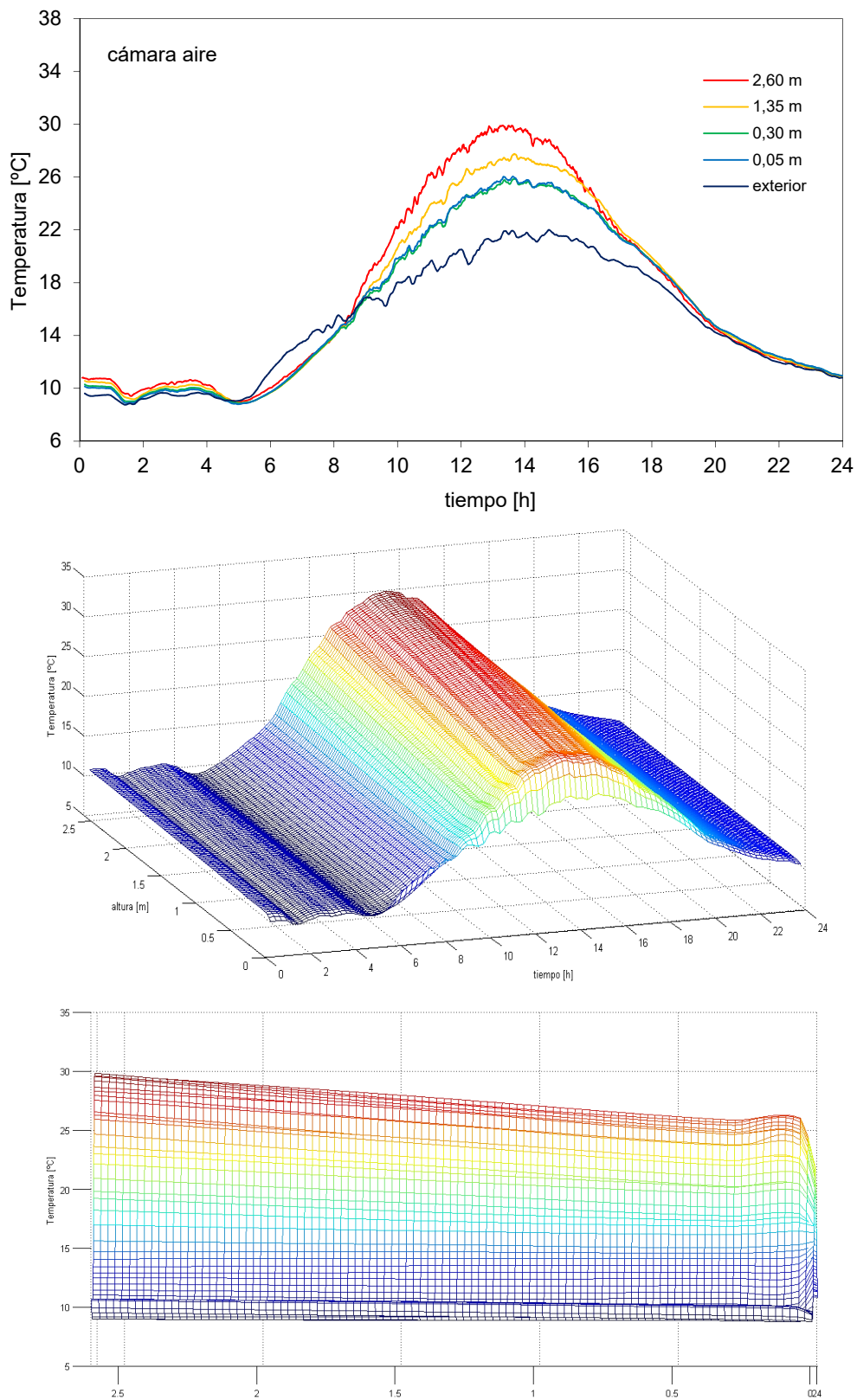


Figura 4.81 - Temperatura del aire de la cámara ventilada

En cuanto a la evolución de las temperaturas del aire dentro de la cámara ventilada, se puede observar un pico de calentamiento en la zona de entrada, y una evolución lineal en el resto de la altura. Si se comparan las temperaturas del aire dentro de la cámara frente a la temperatura exterior, se puede observar como entre las 5 y la 8 de la mañana, el aire dentro de la cámara está más frío que en el exterior, lo que implica un flujo de aire descendente.

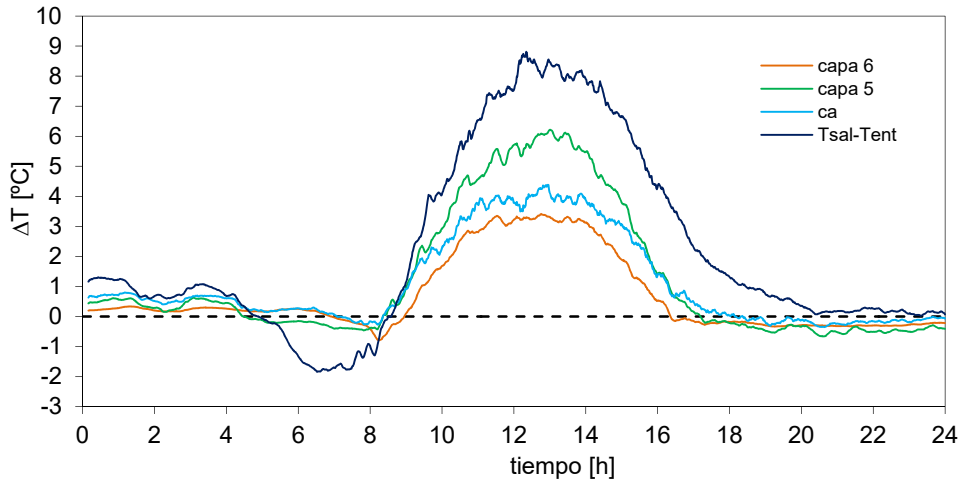


Figura 4.82 – Salto de temperatura entre la parte inferior y superior dentro de la cámara ventilada y respecto al aire exterior

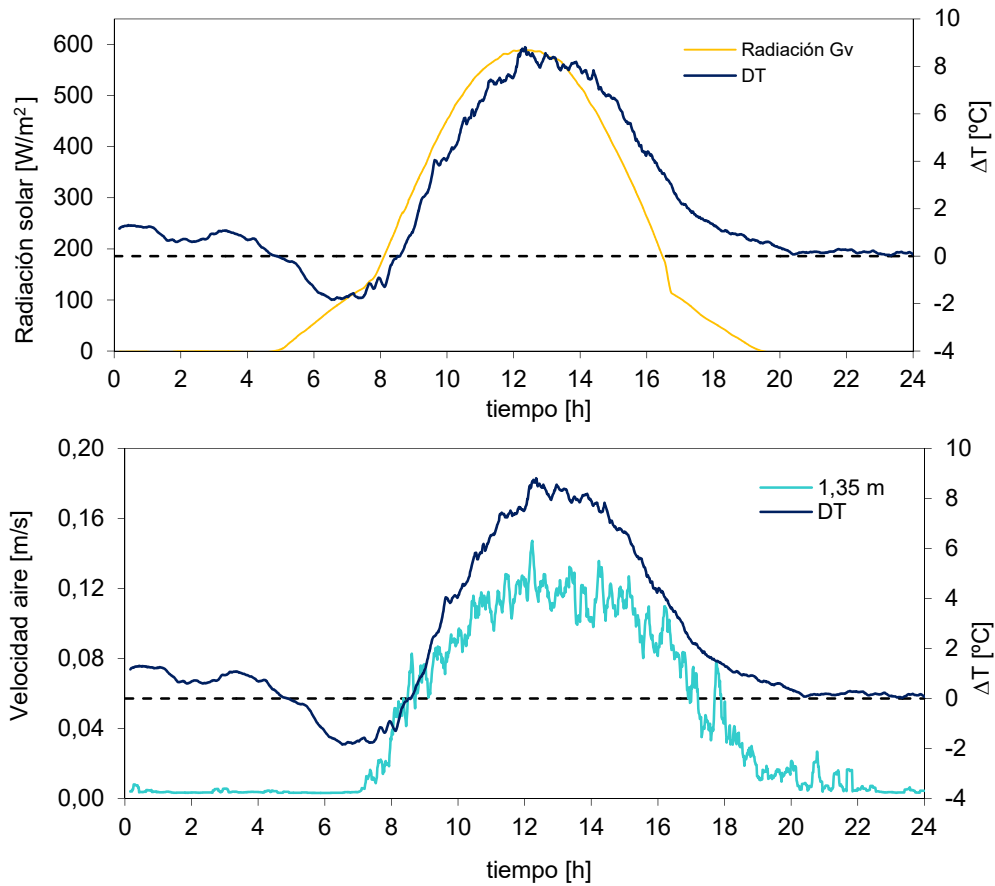


Figura 4.83 – Evolución del salto de temperatura del aire dentro de la cámara ventilada frente a la radiación solar y velocidad del aire a media altura

En la Figura 4.82 se muestra el salto de temperaturas entre la parte inferior y superior de la fachada para las dos superficies y para el aire, frente al salto de temperaturas del aire en el punto de salida de la cámara y el aire exterior. Se puede apreciar más claramente como la superficie del aislante es la que experimenta el mayor salto de temperaturas, frente al gradiente de temperaturas que experimenta la superficie exterior, que se aproxima más al gradiente del aire dentro de la cámara ventilada. En la Figura 4.83 se muestra la comparativa entre el salto de temperaturas de salida y aire exterior respecto a la radiación solar y respecto a la velocidad medida a media altura. Se puede observar como el salto de temperaturas y la velocidad del aire dentro de la cámara ventilada sigue a la radiación solar, con un pequeño desfase debido a la poca inercia de la hoja exterior formada por la placa de cemento. En la Figura 4.84 se muestra, en la gráfica superior, el perfil transversal de temperaturas para cada capa de la fachada, a media altura de la muestra.

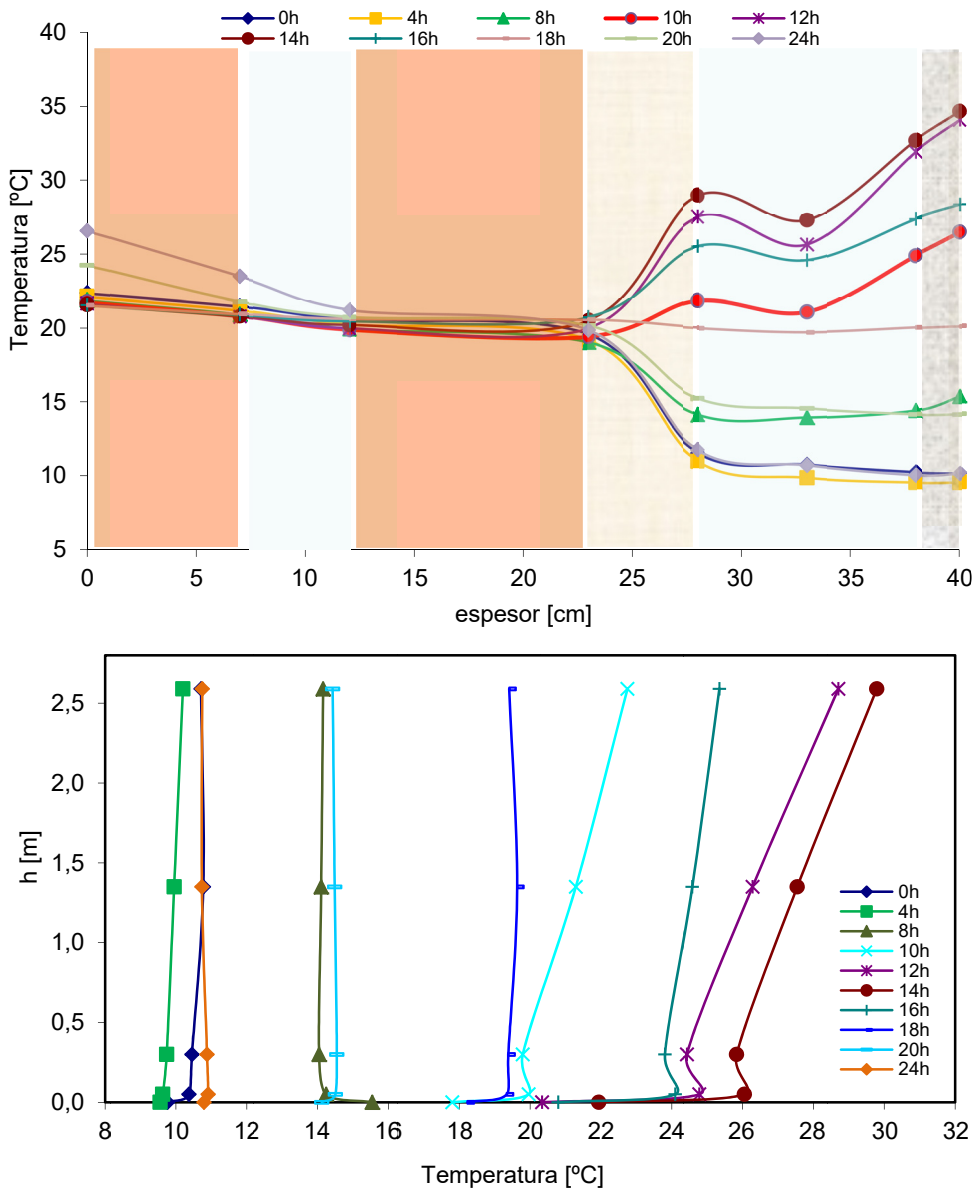


Figura 4.84 – Perfiles de temperatura muestra de fachada ventilada ligera a lo largo del día 16 de mayo

En la gráfica inferior se muestra la evolución de la temperatura del aire en función de la altura dentro de la cámara ventilada, para diferentes instantes del día. Se puede ver cómo durante las horas nocturnas, curvas de 0h y 4h, el aire dentro de la cámara presenta la misma temperatura, prácticamente, en toda la altura de la cámara ventilada, y muy próxima, aunque algo superior, a la del aire exterior. En la sección transversal, el perfil de temperaturas es muy plano, tanto las superficies de la cámara como el aire presentan valores próximos entre sí. El punto más caliente, durante este periodo, corresponde a la superficie del aislante debido al flujo de calor que procede desde el interior de la celda. Durante las horas del amanecer, desde las 5h hasta las 9h, comienza a aumentar rápidamente la temperatura del aire exterior, pero debido a la inercia de la hoja de cemento la temperatura de la cámara de aire evoluciona más lentamente, lo que genera un movimiento del flujo de aire con sentido descendente durante este espacio de tiempo.

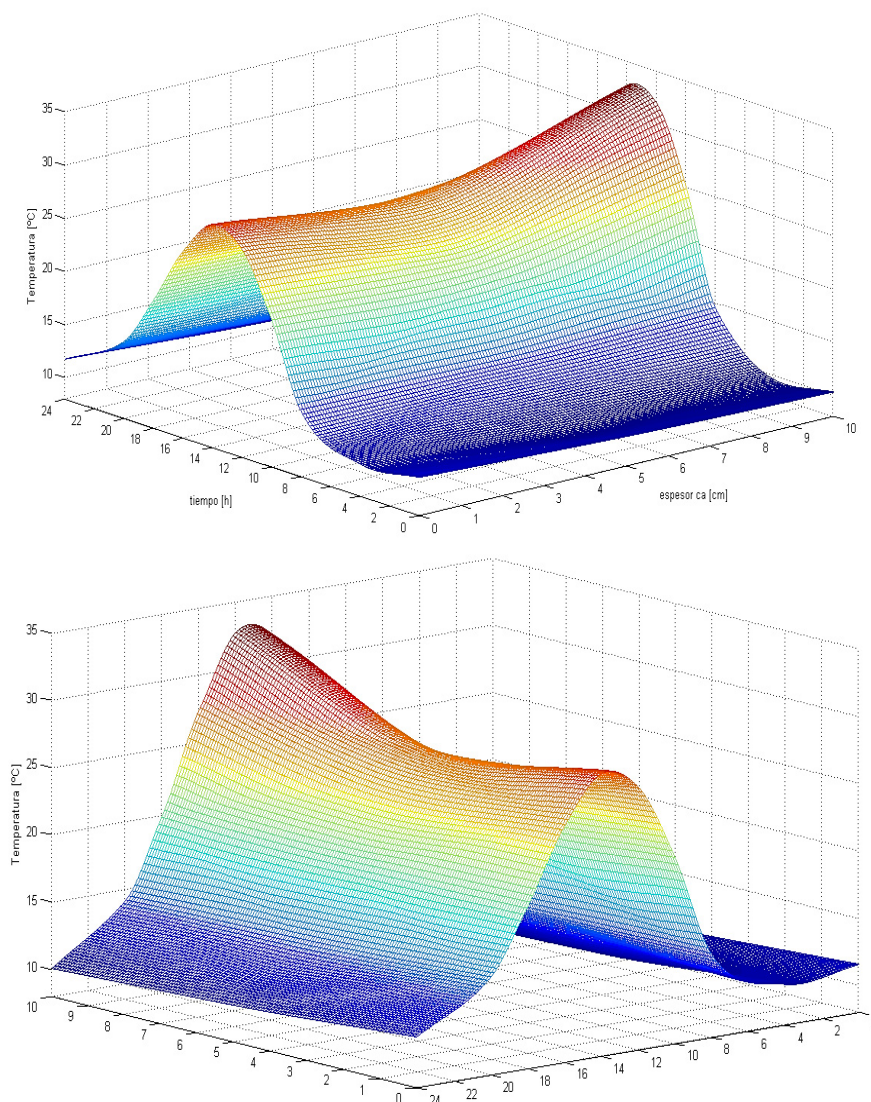


Figura 4.85 – Evolución perfil de temperaturas en el punto central de la cámara ventilada a lo largo del día

Esta situación se puede ver claramente en los perfiles de temperatura correspondientes a las 8h, donde se aprecia que la temperatura más alta pasa a ser la de la placa de cemento, y donde se ve como la superficie exterior de la misma es más alta que la correspondiente a la superficie interior en contacto con la cámara de aire.

En las curvas que van desde las 10h hasta las 16h, se observa que en la cámara ventilada se forma un perfil de temperaturas parabólico, con las dos superficies que presentan una temperatura superior a la del aire. Siendo la más caliente la correspondiente a la placa de cemento que intercambia calor por radiación con la superficie del aislante y con el aire por convección. La temperatura de la lana sube por encima de la temperatura interior del muro gracias a esta energía de radiación recibida, conduciendo parte hacia el interior y transmitiendo el resto al aire por convección. Por tanto, el mecanismo de radiación entre las dos superficies de la cámara en fachadas ventiladas es un componente fundamental a la hora de modelizarlas. También se puede apreciar en los perfiles en altura, como el aire experimenta un calentamiento lineal entre la entrada y la salida de la cámara ventilada. Durante este periodo es donde se producen las velocidades de desplazamiento del aire más altas. En las curvas correspondientes a la 18h y posteriores, los perfiles de temperatura, tanto transversales, como en altura, se vuelven otra vez planos, y se reducen las velocidades del aire dentro de la cámara ventilada. Esta evolución de las temperaturas dentro de la cámara de aire se puede ver con más claramente en la Figura 4.85, en la que se muestra el perfil a media altura a lo largo del día.

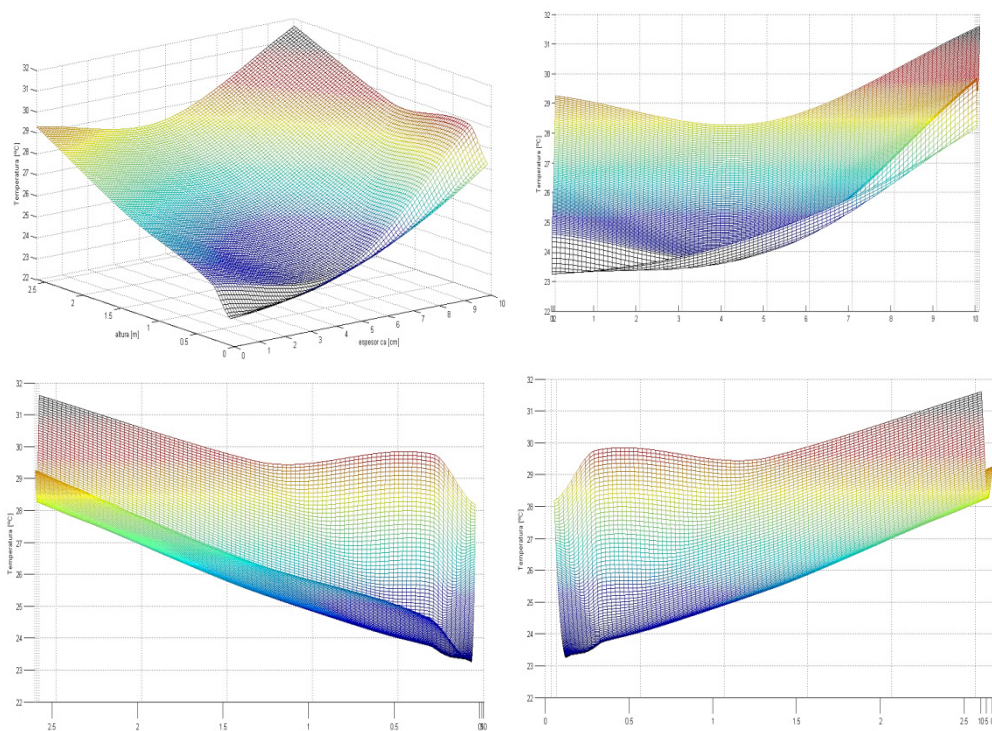


Figura 4.86 – Evolución del perfil de temperaturas en altura en la cámara ventilada para las 14h

En la Figura 4.86 se muestra la evolución del perfil de temperaturas transversal en altura, desde la entrada hasta la sección de salida, dentro de la cámara de aire para el instante de tiempo correspondiente a las 14h, donde se alcanzan las máximas temperaturas. Se puede observar como en los primeros 50 [cm] se aprecia el efecto de la entrada en el perfil transversal. En este tramo, la superficie de cemento presenta la mayor temperatura, seguida por el aire, y la superficie del aislante es el punto más frío. Una vez superado el efecto del movimiento turbulento de la entrada, el perfil se vuelve parabólico con la temperatura mínima en el punto central del aire. Una vez analizadas las temperaturas se pasa a evaluar el comportamiento de la velocidad del aire dentro de la cámara ventilada, parámetro que participa directamente en los coeficientes de convección y en el caudal másico circulante. En la Figura 4.87 se muestran las curvas de velocidad para los cuatro puntos de medida en altura de la muestra, gráfica superior, y

los perfiles para diferentes instantes del día. En la Figura 4.88 se muestra la superficie de velocidades obtenida a través de los datos registrados, que aporta una visión más clara del comportamiento de la velocidad del aire a lo largo del día tipo seleccionado.

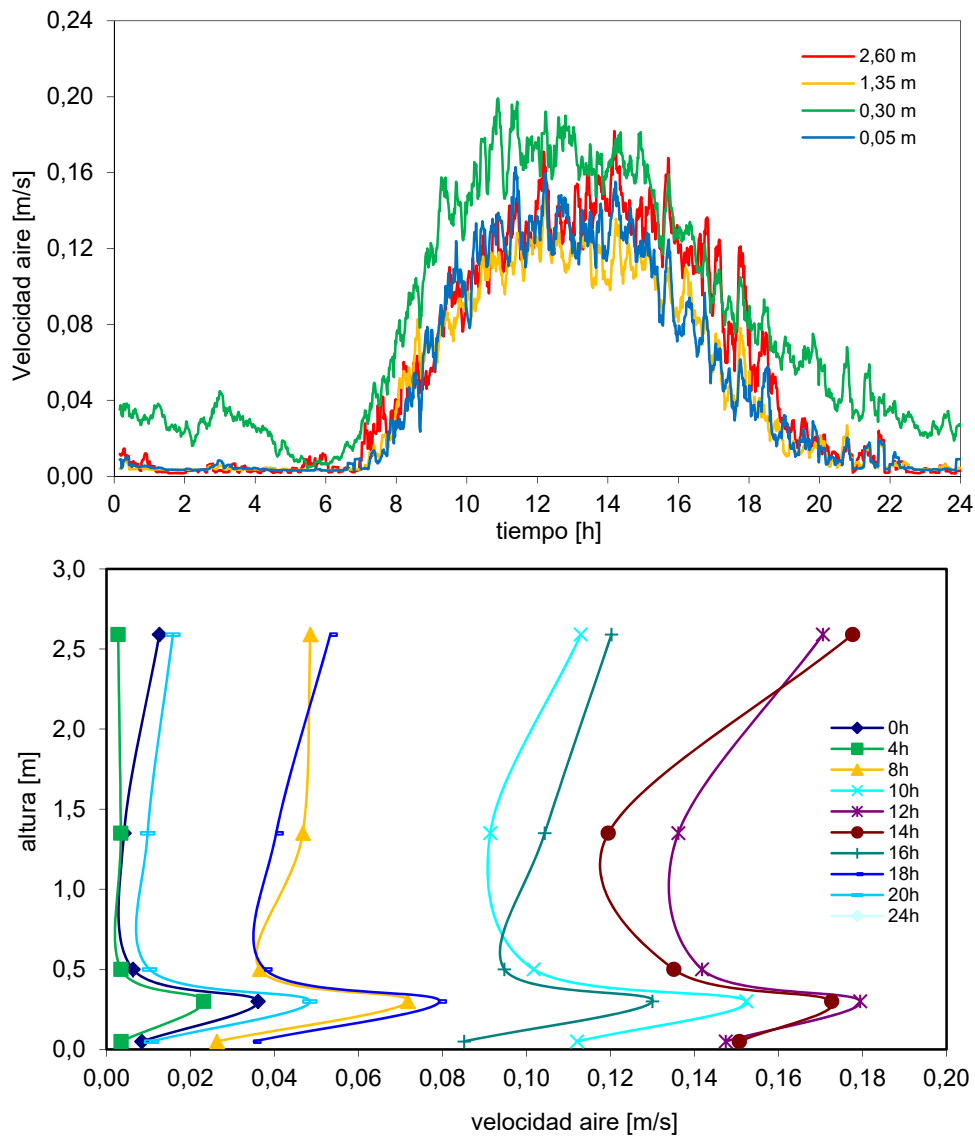


Figura 4.87 – Velocidad del aire en la cámara ventilada en función de la altura a lo largo del día 16 de mayo

Como se puede observar, las velocidades máximas que se alcanzan dentro de la cámara ventilada no superan valores de 0,2 [m/s]. Se marca claramente el efecto de la entrada en la punta de velocidad que se obtiene en el sensor situado a 30 [cm] de altura, y como a partir de los 50 [cm] desaparece el efecto de las turbulencias producidas por la entrada. Analizado la evolución de los perfiles de velocidad, se puede ver como durante la primera horas nocturnas, desde las 0h hasta las 4h, se va parando el proceso ascendente de movimiento del aire, con valores muy pequeños, prácticamente nulos, y con un perfil en altura constante. A partir de las 8h se puede ver como aumenta los valores de velocidad, pero con poca aceleración del aire dentro de la cámara ventilada. Entre las 10h y las 16h se alcanzan los valores máximos de velocidad y se ve como el fluido se acelera en la mitad inferior de la fachada, alcanza un mínimo en la zona central, a media altura, y se vuelve a acelerar en la parte final de salida. Desde las 18h en adelante, los valores de velocidad vuelve a bajar y el perfil se aplanan en altura.

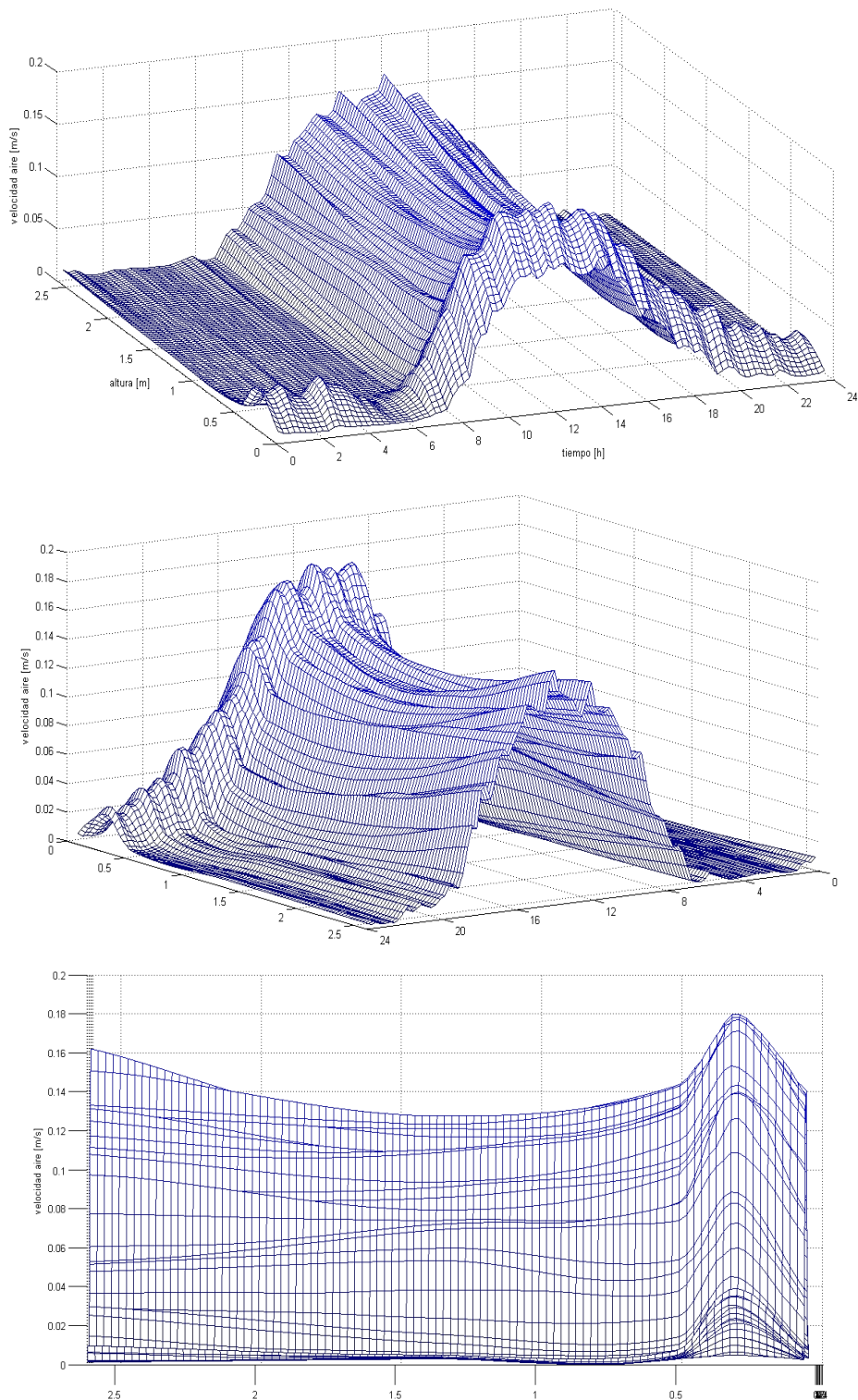


Figura 4.88 – Evolución del perfil de velocidades en altura en la cámara ventilada para el día 16 de mayo

Comparando la respuesta de las velocidades medidas respecto a los valores de temperatura del aire y de las superficies de la cámara ventilada, se obtiene una coherencia entre los distintos registros. Por lo que, se puede considerar, que las medidas realizadas son válidas y sirven como base fiable para el posterior estudio de los modelos a desarrollar para caracterizar el comportamiento convectivo de la

fachada ventilada. Por último, quedaría por revisar los datos correspondientes a los sensores puntuales de flujo de calor. Ya se ha comentado que esta medida presenta un alto grado de incertidumbre debido a que la calibración de los mismos no tiene en cuenta el efecto convectivo. Pero, aún así, se puede considerar que los datos pueden ser útiles de cara a contrastar los resultados que se obtengan de los modelos. En la Figura 4.89 se muestran los valores medidos en las dos superficies de la cámara ventilada. Se puede observar cómo se produce el cambio en el sentido del flujo de calor intercambiado cuando comienza el calentamiento de la fachada por la incidencia solar.

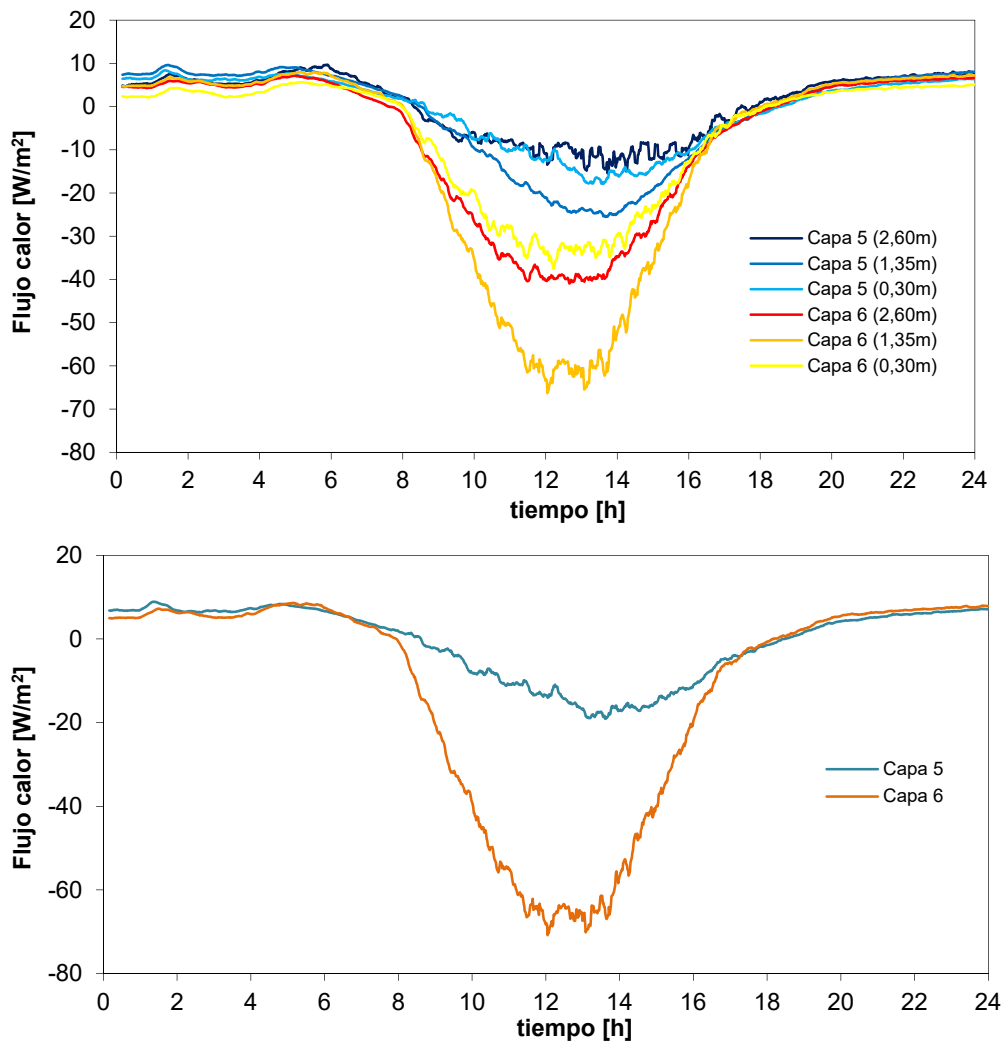


Figura 4.89 – Flujo de calor en las superficies de la cámara ventilada a a lo largo del día 16 de mayo

Durante las primeras horas sin incidencia solar el flujo es saliente en la superficie del aislante y entrante en la superficie de cemento, es decir, el foco de calor en la cámara ventilada es la superficie del aislante. Sin embargo, durante las horas con calentamiento solar, el sentido se invierte, y la placa de cemento pasa a ser el foco emisor de calor. Durante este periodo, la magnitud de los flujos de calor intercambiado es muy superior al periodo sin radiación solar. Analizando los valores medidos en función de la altura, se obtiene que los valores registrados en la zona central, para ambas superficies, es superior al medido tanto en la zona de entrada como al medido en la zona de salida. Este comportamiento se puede explicar debido a los desequilibrios en el movimiento de aire que se producen en las zonas de cambio de sección y que afectan a la precisión de la medida de los fluxímetros. Para disponer de una imagen

más clara del intercambio de calor que se produce en cada superficie, en la gráfica inferior de la Figura 4.89 se muestra una estimación ponderada por la superficie del flujo total. Se verifica como la hoja exterior es el foco de calor principal en la cámara ventilada, y se obtienen unos resultados coherentes con las temperaturas medias de cada capa y del aire dentro de la cámara ventilada. En el *Capítulo 5*, en el apartado 5.2.3.2, se realiza un análisis más detallado de la validez de estos sensores para la caracterización del intercambio de calor en sistemas de fachadas ventiladas. Una vez analizados los datos del ensayo de la fachada ventilada ligera, en el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos en la muestra de hoja ventilada pesada. Este ensayo aporta una información fundamental para determinar el efecto de la inercia térmica en el comportamiento energético de este tipo de fachadas.

4.2.3 Fachada ventilada pesada

Como en el caso anterior, el ensayo se descompone en dos periodos, uno de ellos se emplea para la definición del modelo y el otro periodo como contraste y validación. A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos durante el periodo de modelado, en el que se aplican las dos rutinas de calentamiento a la sala de ensayos, primero se aplica la rutina PRBS, y posteriormente se aplica la rutina ROLBS. De esta forma se aprovecha la baja frecuencia que permite caracterizar adecuadamente el carácter inercial de la muestra y posteriormente se prueba el comportamiento frente a las altas frecuencias. En la Figura 4.90 y en la Figura 4.91 se muestran las condiciones ambientales bajo las que se realiza el ensayo. Durante los 19 días que dura el ensayo se produce una gran variabilidad de las condiciones ambientales.

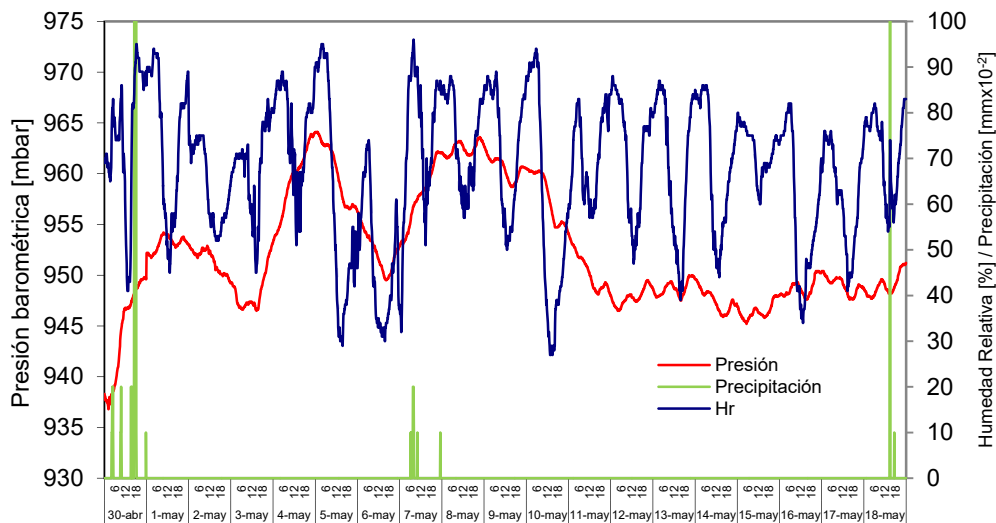


Figura 4.90 – Condiciones ambientales durante el ensayo de la fachada ventilada pesada durante el periodo de modelado

En la primera parte se corresponden con días de bajas presiones con precipitaciones y bajas temperaturas. Durante estos primeros días de ensayo la incidencia solar es pequeña y las velocidades de viento son relativamente altas. A continuación se producen una serie de días soleados en los que sube la temperatura ambiental, para finalizar el periodo de ensayo con unos días en los que se mezclan ambas condiciones ambientales.

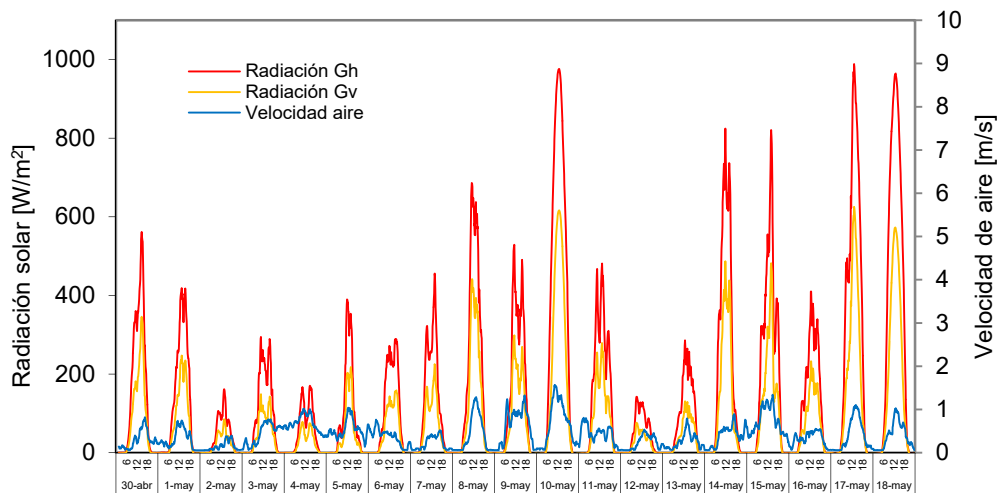


Figura 4.91 – Radiación solar y velocidad de viento durante el ensayo de modelado de la fachada ventilada pesada

En la Figura 4.92 se muestra la rutina de excitación inyectada en la sala de ensayos junto al flujo de la envolvente. Se decide reducir la potencia de calefacción a 200 [W] debido a la larga duración del ensayo y a la previsión de buenas condiciones ambientales exteriores, para evitar sobrecalentamientos en la sala de ensayos.

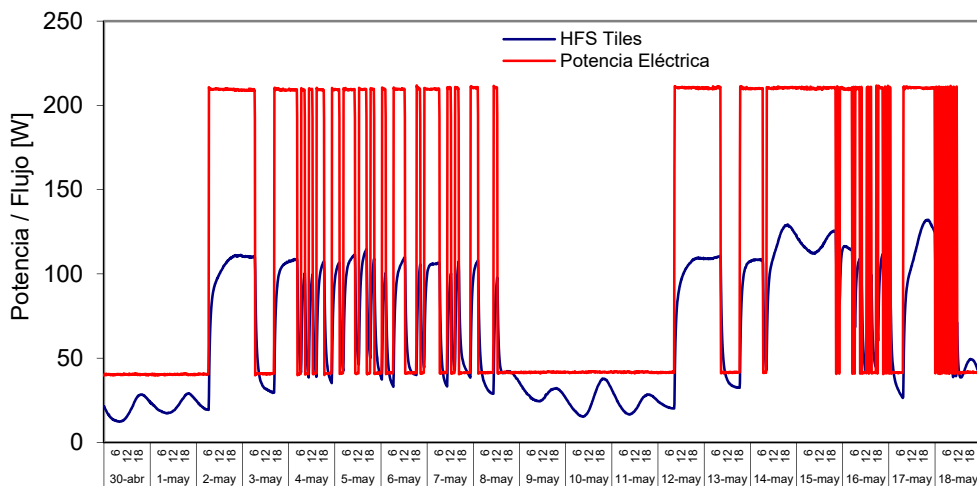


Figura 4.92 – Potencia introducida y flujo de calor de la envolvente de la sala de ensayos para la fachada ventilada pesada

En la Figura 4.93 se recogen las temperaturas de la sala de ensayos y del ambiente exterior. Es de destacar la alta temperatura del interior de la celda. Esto se debe a que previamente se realiza un periodo de acondicionamiento de la muestra. En la Figura 4.94 se puede ver el análisis para la validación de las condiciones de temperatura del ensayo. El salto medio entre ambientes es del orden de los 15°C y la homogeneidad de temperaturas dentro de la sala de ensayo es correcta, mejorando incluso las condiciones de los ensayos anteriores, en especial la homogeneidad de la temperatura de aire, debido a la baja potencia de calefacción. Respecto a la muestra de fachada ventilada pesada, en la Figura 4.95 se muestra la evolución de la temperatura media en cada una de las capas de la probeta. Como en el ensayo anterior, el comportamiento del muro base, tras la capa de aislamiento térmico, se aproxima a las condiciones de flujo unidimensional, con pequeños gradientes térmicos a lo largo de las superficies de las diferentes capas.

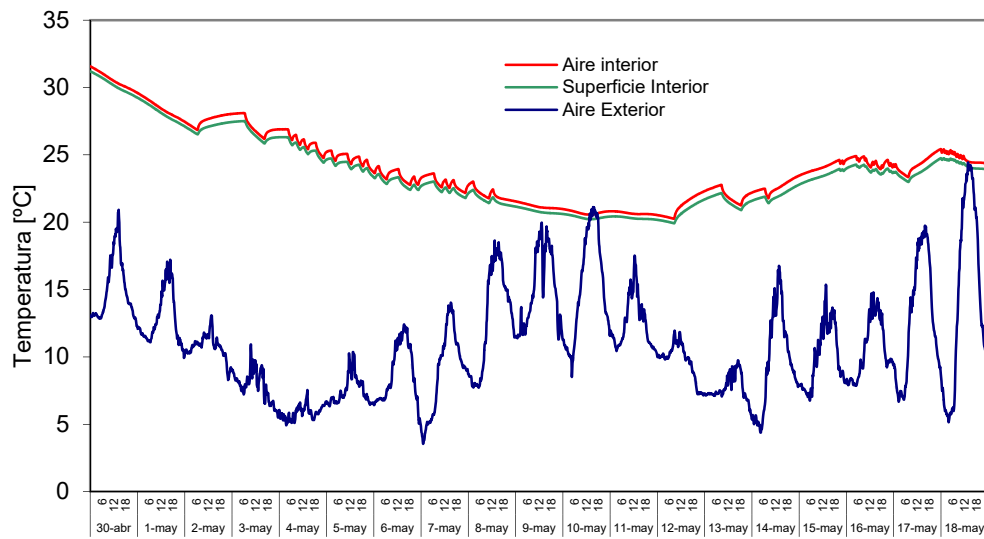


Figura 4.93 – Temperatura de la sala de ensayos y ambiental para la fachada ventilada pesada

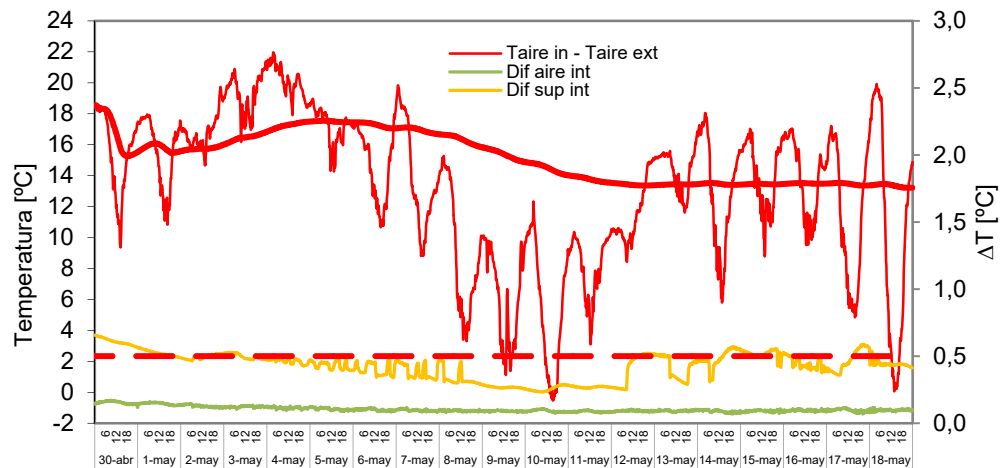


Figura 4.94 – Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada pesada

Sin embargo, sí que se observa una clara diferencia en el comportamiento de la cámara ventilada. En el caso de la fachada ligera, las temperaturas de las superficies y del aire eran próximas y seguían perfectamente las condiciones ambientales exteriores. En el caso de la fachada pesada se puede apreciar como la *capa 7*, superficie exterior, sigue a la excitación sol-aire exterior, pero como la *capa 6*, superficie interior de la hoja ventilada, presenta un desfase y atenuación debido a la alta inercia térmica. Y por tanto, las temperaturas de la superficie del aislante y del aire interior siguen a la temperatura de dicha capa. Esta situación repercute en un comportamiento térmico diferente. Esto se ve con más detalle en el análisis de un día tipo que se realiza posteriormente. En cuanto a los flujos de calor puntual, del estudio realizado sobre la fachada ligera, que se recoge en el apartado 5.2.3.2, se obtiene que la lectura de los fluxímetros situados en la cámara ventilada se ve influenciada en gran medida por el intercambio radiativo. Estos sensores no aportan un valor añadido a la caracterización experimental, y debido al reducido espacio disponible en la cámara ventilada se decide no incluirlos en el resto de ensayos. Por tanto, sólo se registran los flujos puntuales correspondientes a las capas interiores del muro base. En la Figura 4.96 se muestran dichos valores. Se puede observar como el muro base viene de un periodo de calentamiento previo, ya que los flujos en las superficies internas, *capa 2 y 3*, son más

elevados que en la superficie del yeso, *capa 1*, durante la primera mitad el ensayo. Posteriormente, se ve un comportamiento más similar al del resto de ensayos anteriores, aunque se puede apreciar un desfase en la transmisión del flujo de calor, esto representa otro ejemplo experimental de la inercia de la hoja ventilada.

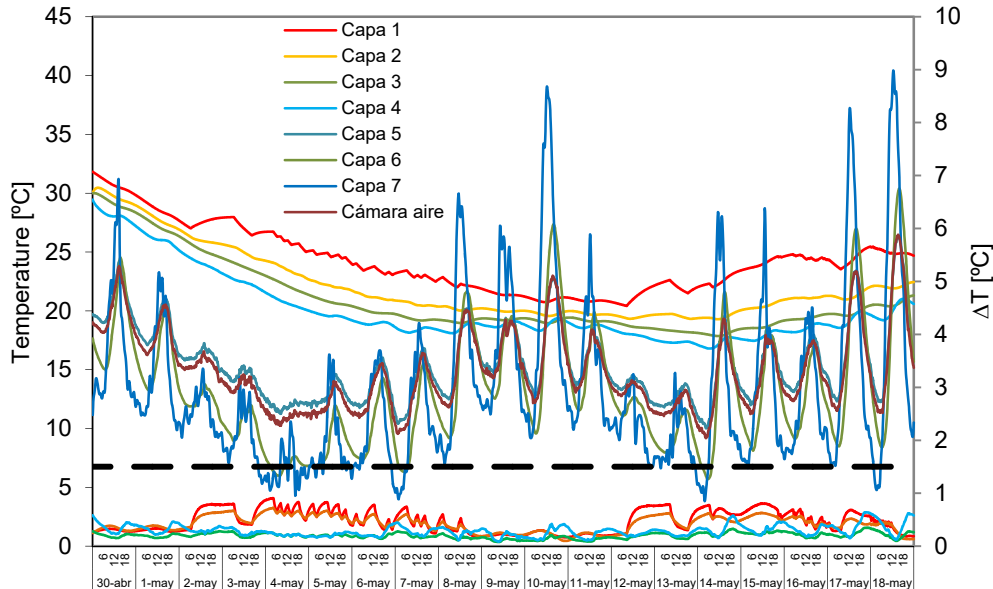


Figura 4.95 – Temperaturas en la probeta de fachada ventilada pesada

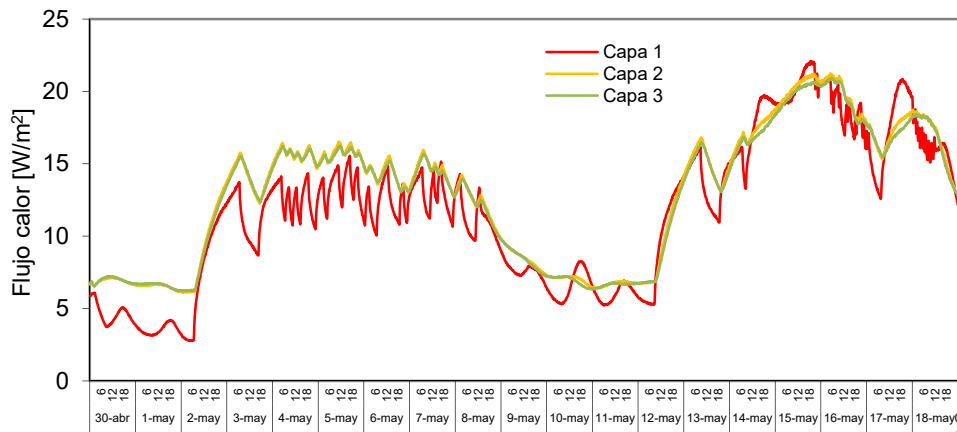


Figura 4.96 – Flujos de calor puntuales medidos en la zona central del muro base en la probeta de fachada ventilada pesada

Para verificar los efectos de borde en la muestra, en la Figura 4.97 se recogen los flujos puntuales medidos en la superficie interior, *capa 1*, para el punto central y las dos zonas de borde. El flujo medio medido en la zona central es de $11,33 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Teniendo en cuenta que las condiciones ambientales son similares a las que se dan durante el ensayo de la fachada ventilada ligera, y el salto de temperaturas entre ambientes es menor en el caso de la fachada ventilada pesada, muestra un comportamiento más refrigerante. En cuanto a la zona de borde, el flujo medio es de $11,48 \text{ [W/m}^2\text{]}$, y en la zona de esquina de $11,72 \text{ [W/m}^2\text{]}$, lo que corresponde con un 1,3% y 3,4% de diferencia, respectivamente. En principio, esto implica una influencia reducida de los efectos de borde en el comportamiento de la probeta, menor incluso que en la fachada ventilada ligera. Una vez validadas las condiciones de ensayo se pasa a evaluar el comportamiento de la cámara ventilada, teniendo en cuenta la comparativa respecto al comportamiento obtenido durante el ensayo de la fachada ligera.

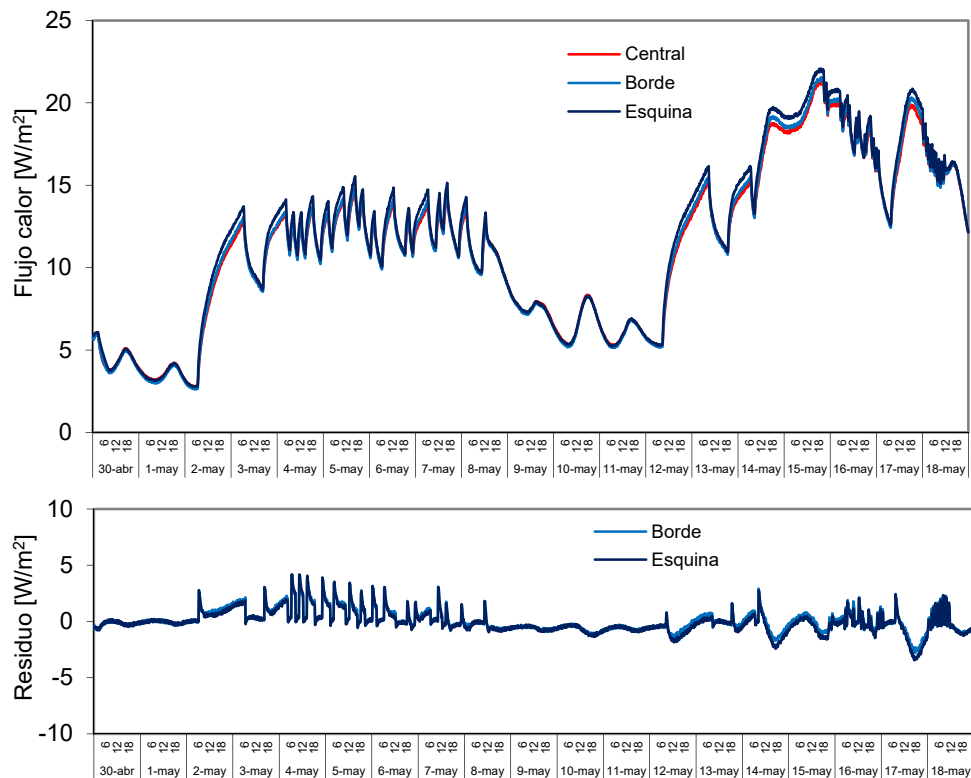


Figura 4.97 –Flujos superficiales en la cara interior, *capa 1*, para la muestra de fachada ventilada pesada

En la Figura 4.98 se muestran las temperaturas en las dos superficies y en el aire de la cámara ventilada, para el eje central, y a diferentes alturas. Se pueden apreciar varios aspectos del comportamiento de la cámara ventilada diferentes a los medidos en la fachada ligera. Por un lado, los ciclos día y noche se ven atenuados por la inercia de la hoja exterior, como se puede observar en la gráfica de la *capa 6*, respecto a la misma capa de la fachada ventilada ligera. Y esa atenuación se traslada a las temperaturas del aire dentro de la cámara ventilada y de la superficie interior del aislante. Esto produce una mayor diferencia en el comportamiento de la superficie exterior respecto al comportamiento del aire y de la superficie interior. Esto se aprecia mejor en las gráficas de temperaturas medias de cada capa. En la Figura 4.73 se puede ver como en la fachada ligera las temperaturas de la cámara ventilada siguen un comportamiento muy parejo, frente a la fachada pesada, en la Figura 4.95, donde la superficie del aislante presenta menos oscilaciones que la de la hoja pesada, y el comportamiento del aire dentro de la cámara se acerca más al de la superficie del aislante que al de la hoja de hormigón. Este efecto también se ve originado por el cambio en el espesor de la cámara de aire, además de por la inercia térmica de la hoja exterior.

Por otro lado, el calentamiento en altura de la cámara ventilada es diferente. En la fachada ligera se puede ver como durante las horas nocturnas, todos los puntos de medida se solapan, y los gradientes de temperatura se aprecian durante las horas de incidencia solar y son progresivos. Sin embargo, para la fachada pesada, no se produce homogenización de temperaturas durante los periodos nocturnos, sino que se mantienen los gradientes de temperatura en función de la altura, siendo estos mayores incluso, durante los periodos nocturnos, que durante los periodos diurnos. Además, se puede ver como las temperaturas inferiores, las situadas a 0,05 [m] y 0,30 [m] se aproximan entre sí, y se produce un salto respecto a las temperaturas superiores, a 1,35 [m] y 2,60 [m], que también presentan valores cercanos entre ellas. De forma que se produce una variación de temperatura rápida en la zona de entrada de la cámara ventilada y a lo largo del resto de la fachada el aumento es mucho menor.

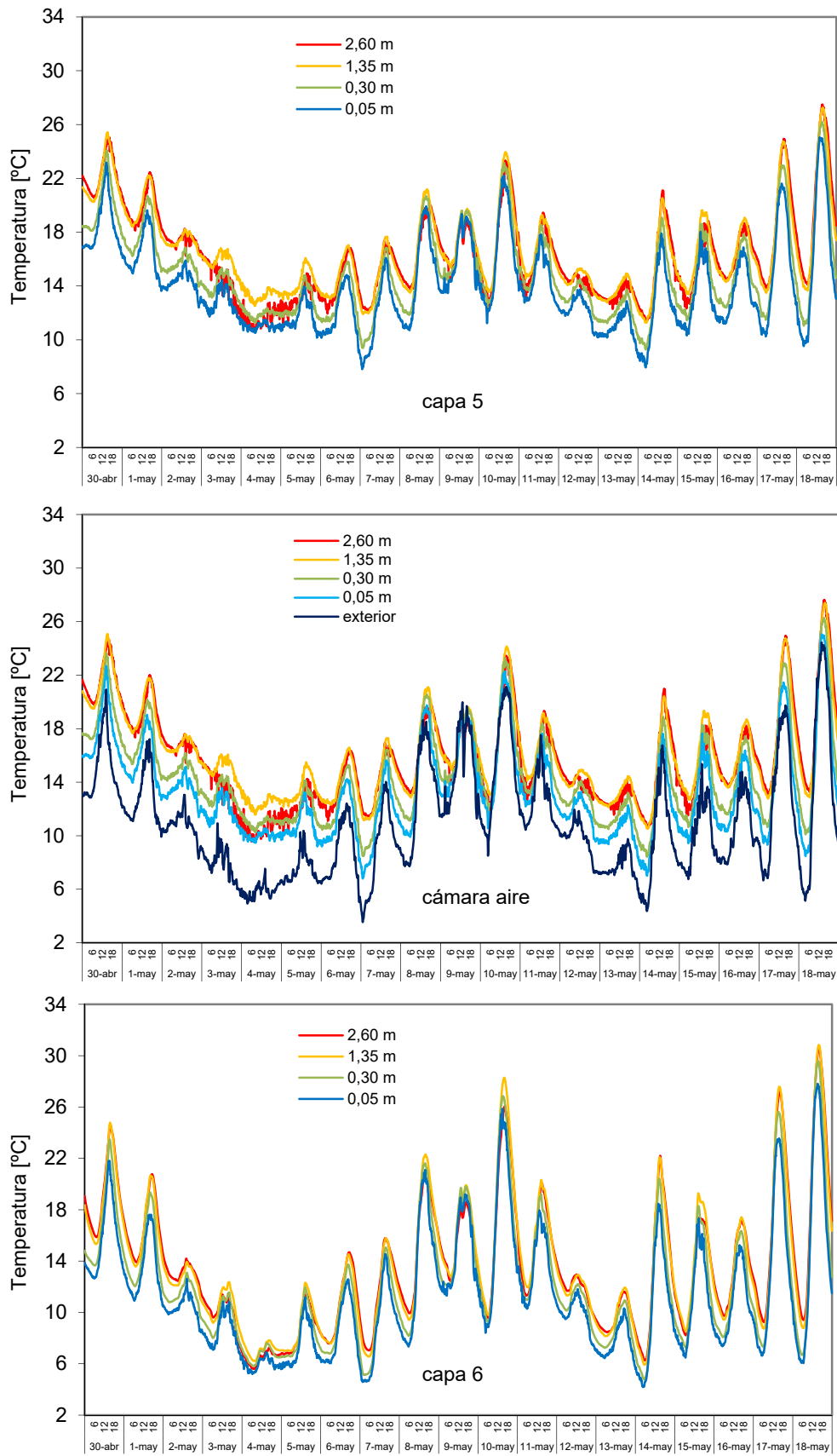


Figura 4.98 –Temperatura en altura en el eje central de la cámara ventilada probeta de fachada pesada

También se puede apreciar como los valores máximos están desfasados en el tiempo, se alcanzan hacia las horas de la tarde, frente a la fachada ligera, en la que se alcanzaban en las horas del mediodía. Este efecto es indicativo de la inercia térmica de la hoja exterior, y tiene una repercusión importante en las cargas térmicas intercambiadas por la fachada. En la Figura 4.99 se muestran los saltos de temperatura que se producen dentro de la cámara ventilada, tanto para las superficies como para el aire. Se puede ver como se mantiene un salto de temperaturas mínimo a lo largo del tiempo, y como la diferencia entre este mínimo y los valores máximos es menor frente a la fachada ligera, en la que durante los periodos sin radiación solar no hay salto de temperatura y rápidamente se alcanzan los gradientes máximos. En cuanto al gradiente en el aire dentro de la cámara ventilada, en la gráfica inferior de la Figura 4.99 se puede observar como el comportamiento se diferencia del que presenta la fachada ligera. Se produce una mayor diferenciación entre el salto neto de temperaturas, desde las condiciones ambientales exteriores a las condiciones de salida de la parte superior de la muestra, al salto de temperaturas que se produce propiamente dentro de la cámara ventilada. Se obtiene que la zona de entrada presenta un efecto importante en el calentamiento del aire, aunque en altura su efecto sea acotado. En cuanto al otro indicador de interés que se obtiene del análisis de los saltos de temperatura del aire, los periodos de inversión de flujo dentro de la cámara ventilada, se muestran en sombreado por la franja azul.

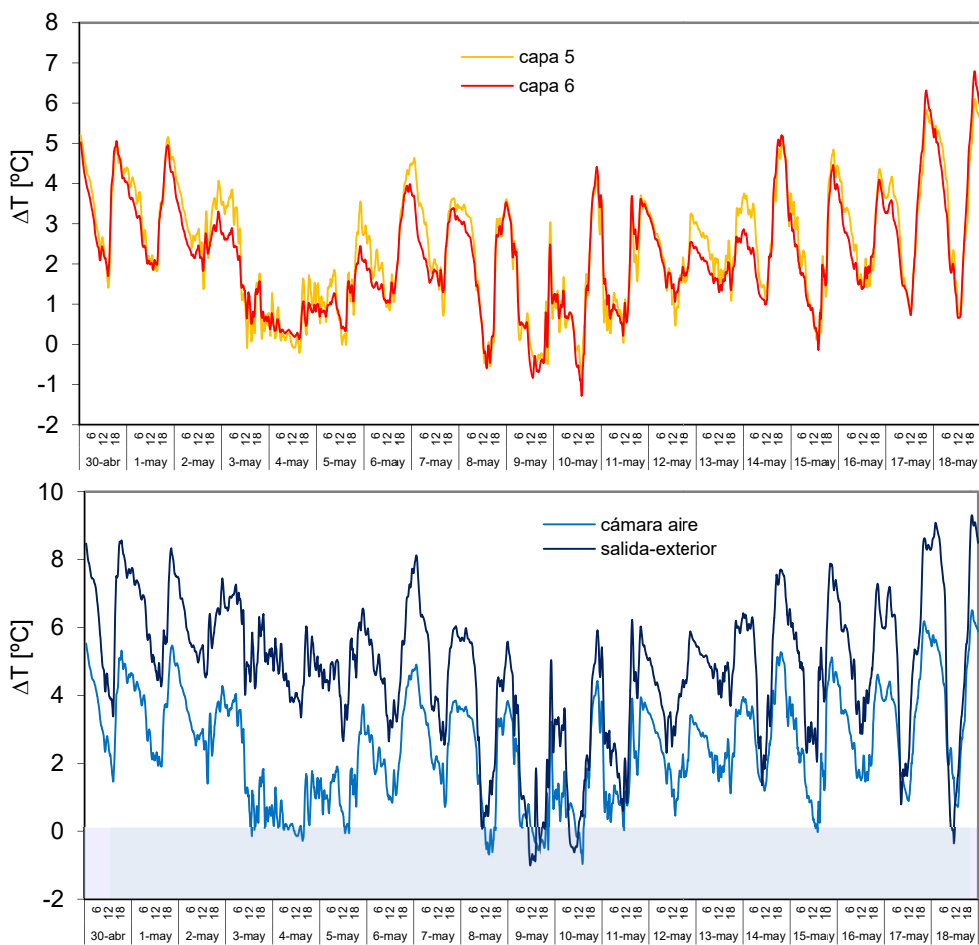


Figura 4.99 – Diferencia de temperatura entre la parte inferior y superior para las dos superficies y el aire de la cámara ventilada para la fachada pesada

Se puede observar cómo, respecto a la fachada ligera, en la que periódicamente durante las horas del amanecer se producía dicha inversión del sentido de movimiento del aire, en la fachada pesada prácticamente no se genera esta situación, salvo en los días centrales del ensayo, en los que se produce un descenso importante de la temperatura ambiental. En este ensayo, además de las temperaturas del eje central, se dispone de la información aportada por la termopila instalada en la cámara de aire. Esta termopila mide con precisión el salto de temperaturas neto que se produce entre la sección de entrada y la sección de salida, y por tanto, comparándola con el salto en el eje central permite cuantificar el efecto de los bordes laterales del portamuestras en el comportamiento de la probeta de fachada ventilada. En la Figura 4.100 se muestra la comparativa entre ambas medidas.

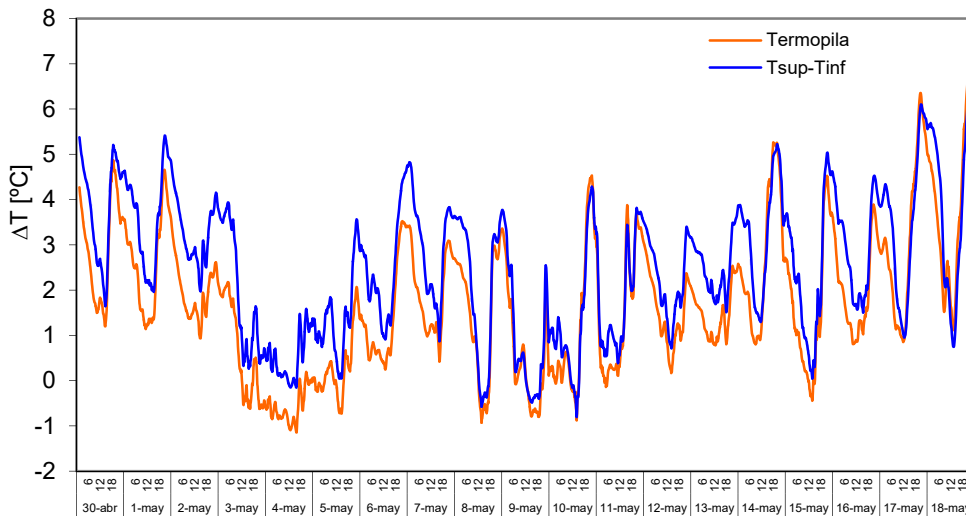


Figura 4.100 – Salto de temperatura en la cámara de aire ventilada medido por la termopila y por las sondas instaladas en el eje central de la muestra

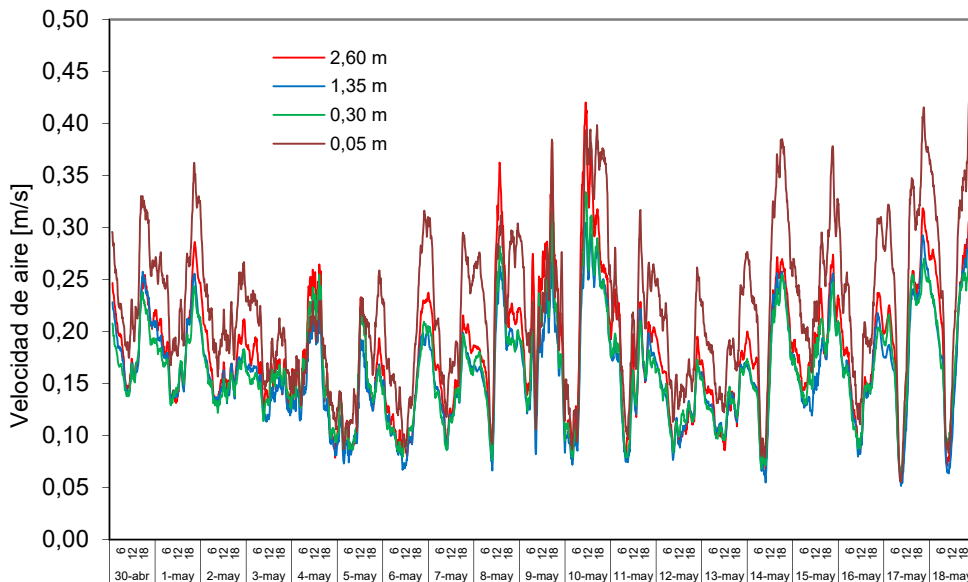


Figura 4.101 – Velocidades de aire cámara ventilada para el eje central en altura para la fachada pesada

Se puede ver como ambos medios de caracterizar el salto de temperaturas dentro de la cámara ventilada dan un comportamiento idéntico, siendo algo inferiores los saltos medidos por la termopila. Este comportamiento era de esperar, ya que en los bordes laterales de la muestra el movimiento de aire se ve reducido. Pero las diferencias

medias entre las dos curvas es de $0,77\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se puede considerar que los bordes de la probeta no están afectando al comportamiento convectivo de la zona central de la muestra, y por tanto, el ensayo es válido para caracterizar el comportamiento térmico de la fachada ventilada. Una vez analizadas las temperaturas, el siguiente parámetro de gran interés son las velocidades que alcanza el aire en su movimiento dentro de la cámara ventilada. En la Figura 4.101 se muestran las lecturas de los cuatro termoanemómetros dispuestos sobre la muestra de fachada pesada. También se puede observar un comportamiento muy diferente frente al obtenido en la fachada ligera. Hay que analizar varios aspectos respecto al comportamiento entre las dos fachadas ventiladas. El primero, los valores de velocidad. En el caso de la fachada pesada se alcanzan velocidades del orden de $0,4\text{ [m/s]}$, valores que doblan los máximos alcanzados en la fachada ligera. Hay que tener en cuenta que la cámara de aire de la fachada pesada es de $3,5\text{ [cm]}$, frente a los 10 [cm] de la ligera, este es un factor importante en el desarrollo del campo de velocidades dentro de la cámara ventilada, y en particular, es un factor fundamental en el módulo de la velocidad. Y además, no se producen valores nulos de velocidad, como si sucedía en la fachada ligera, sino que, por el contrario, siempre hay movimiento de aire dentro de la cámara ventilada, con velocidades mínimas del orden de $0,1\text{ [m/s]}$. El segundo aspecto a analizar es el comportamiento en altura. La velocidad máxima se alcanza en el punto de entrada, punto más inferior que corresponde con la sonda situada a $0,05\text{ [m]}$, y en el resto de alturas se obtienen valores próximos entre sí. Frente a la fachada ligera, en la que la velocidad máxima se producía un poco después de la entrada, en la altura de $0,30\text{ [m]}$. Este comportamiento está totalmente ligado a la geometría de entrada de la cámara ventilada y al espesor de la misma.

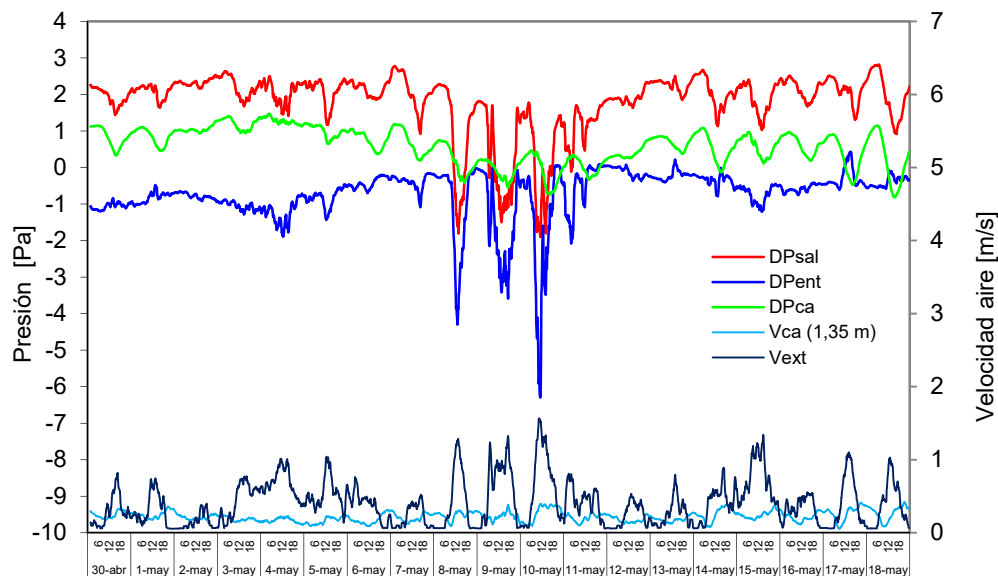


Figura 4.102 – Caída de presión en la fachada pesada y velocidades de aire exterior y de aire dentro de la cámara ventilada

Y por último, el tercer aspecto a analizar es la agitación, se puede apreciar como las lecturas de velocidad de la fachada ligera presentan mayor ruido en la señal, ruido que no es propiamente debido al instrumental de medida, sino más bien, a la variabilidad del movimiento del aire dentro de la cámara ventilada. Este es un aspecto a analizar con detalle en la fase de modelado y en el estudio de la tipología de flujo dentro de la cámara ventilada, de cara a determinar si se están generando flujos laminares o se alcanzan condiciones de régimen turbulento. Lo que condiciona el proceso de intercambio de calor dentro de la cámara ventilada. Al igual que en el estudio de la fachada ligera, se evalúa el efecto del viento exterior en el movimiento convectivo

dentro de la cámara ventilada, extrayendo del estudio aquellos días en los que el proceso de convección sea mixto. En este ensayo se dispone de más información para poder analizar estos efectos. En la Figura 4.102 se muestran las lecturas de los sensores de presión diferencial que se han instalado en la probeta. La configuración de estos sensores se recoge en la Figura 4.30. Se puede observar cómo durante los días centrales del ensayo, los correspondientes al 8, 9 y 10 de mayo, el comportamiento de la cámara de aire es completamente distinto. Si se compara con las velocidades de aire exterior, se puede apreciar que coinciden con días de alto viento, por lo que se puede deducir que en estos días el proceso de convección es mixto y exige un estudio más detallado de cara a decidir si se emplean estos valores para el modelo de convección natural. Para contrastar estas conclusiones, en la Figura 4.103 se muestra la velocidad medida en el punto central en altura respecto al salto de temperaturas entre la salida y la entrada de la cámara ventilada. De forma que se puede comparar directamente el efecto de flotación generado por el calentamiento del aire. Se puede ver como los días en los que el movimiento del aire es debido a convección natural la velocidad del aire dentro de la cámara ventilada evoluciona de forma solapada con el salto de temperaturas del mismo. Sin embargo, los días en los que existe una componente añadida de velocidad debida al viento exterior se producen velocidades de aire sin existir un salto de temperaturas asociado, como sucede en los días 3 y 4 de mayo y en los días ya mencionados 8, 9 y 10 de mayo.

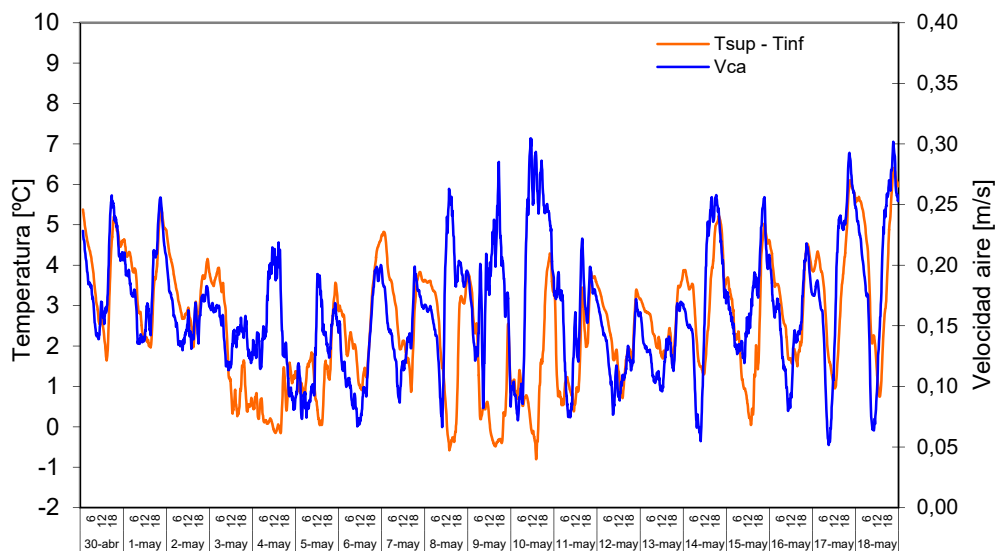


Figura 4.103 – Salto de temperatura entre entrada y salida y velocidad punto medio de la cámara ventilada

Una vez analizados los datos generales, a continuación, se pasa a estudiar con más detalle un día tipo representativo del comportamiento de la fachada pesada. Se selecciona como día tipo el 18 de mayo por presentar unas características representativas. Al igual que en la fachada ligera, en la Figura 104, Figura 4.105 y Figura 4.106 se muestra la evolución de las temperaturas en las superficies que conforman la cámara ventilada y la temperatura del aire dentro de la misma. Se puede observar claramente las diferencias en el comportamiento respecto a la fachada ventilada ligera. La primera diferencia, y de mayor repercusión en el comportamiento térmico de la fachada, es que las curvas de temperatura en los diferentes puntos de altura permanecen separadas durante prácticamente todo el día. Es decir, existe un gradiente de temperatura dentro de la cámara ventilada mantenido. Esto implica un movimiento continuo de aire. Esto se puede ver más adelante cuanto se analizan las medidas de velocidad. Sólo se produce un intervalo de tiempo, que va desde las 12h hasta las 24h, en el que se aproximan entre sí las curvas de temperatura y se reduce el gradiente en altura.

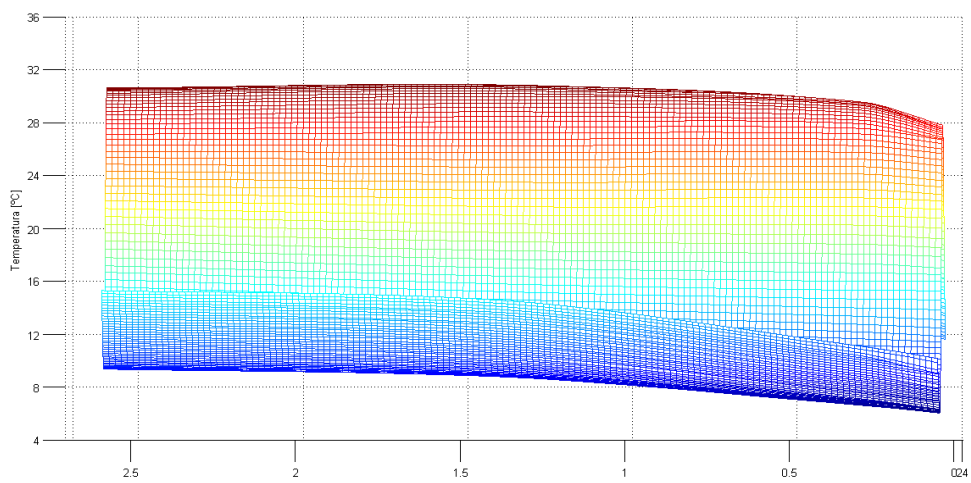
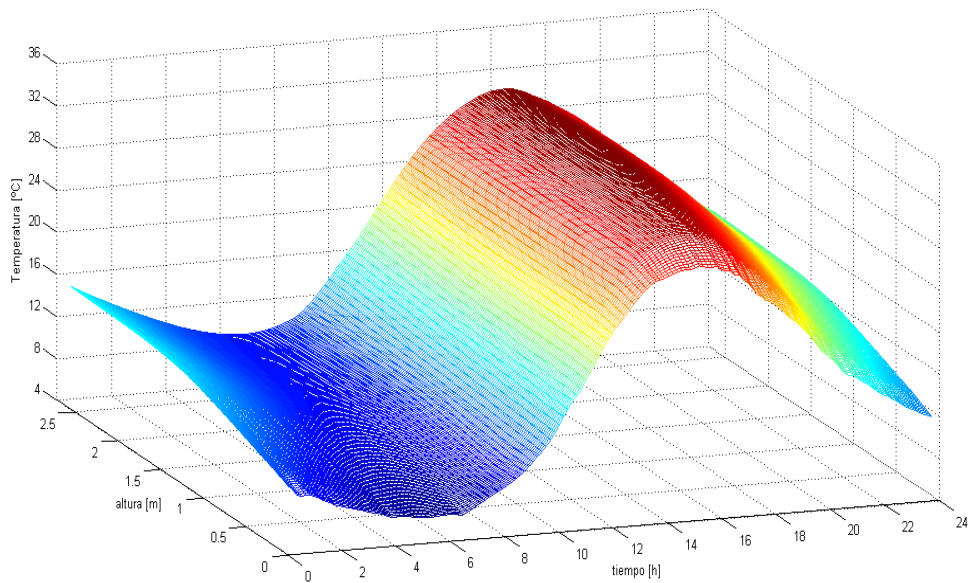
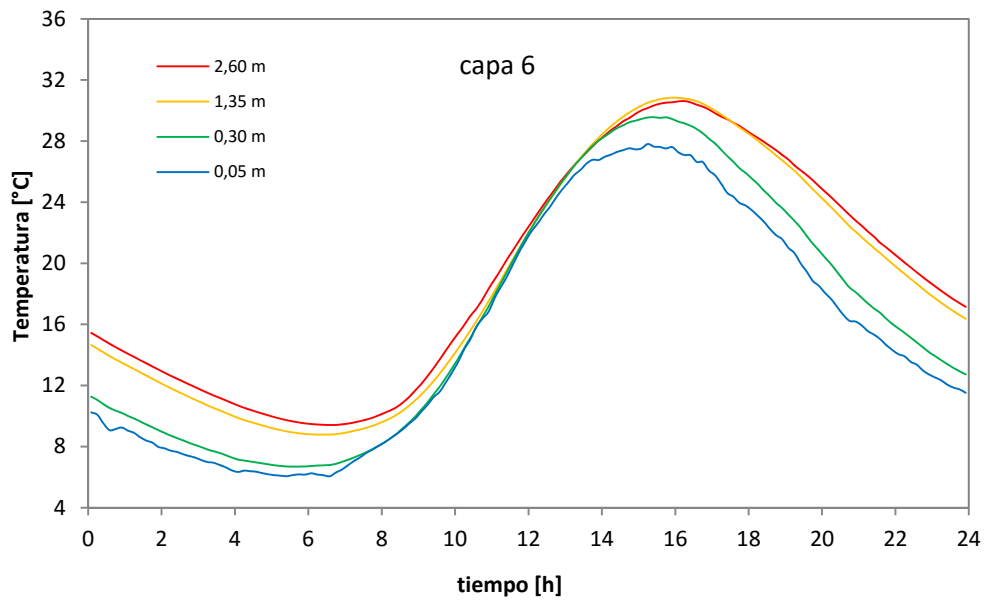


Figura 4.104 – Temperatura en la superficie exterior, capa 6, de la cámara ventilada de la fachada pesada

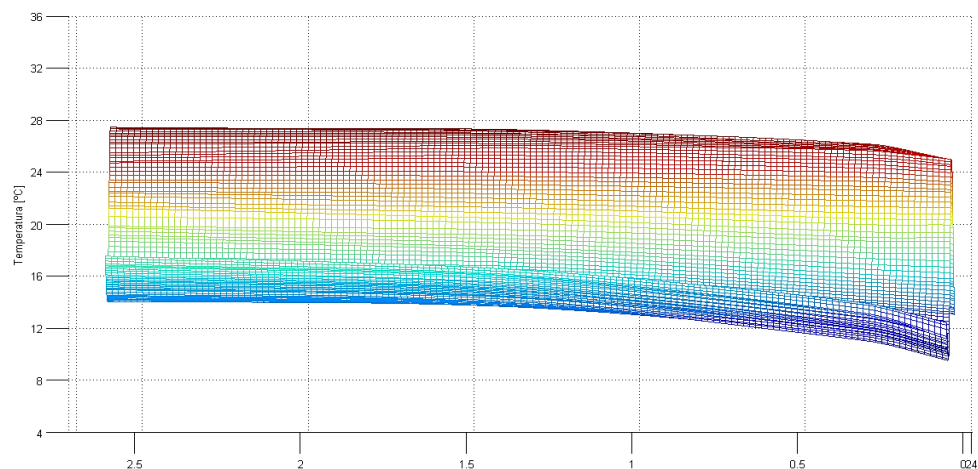
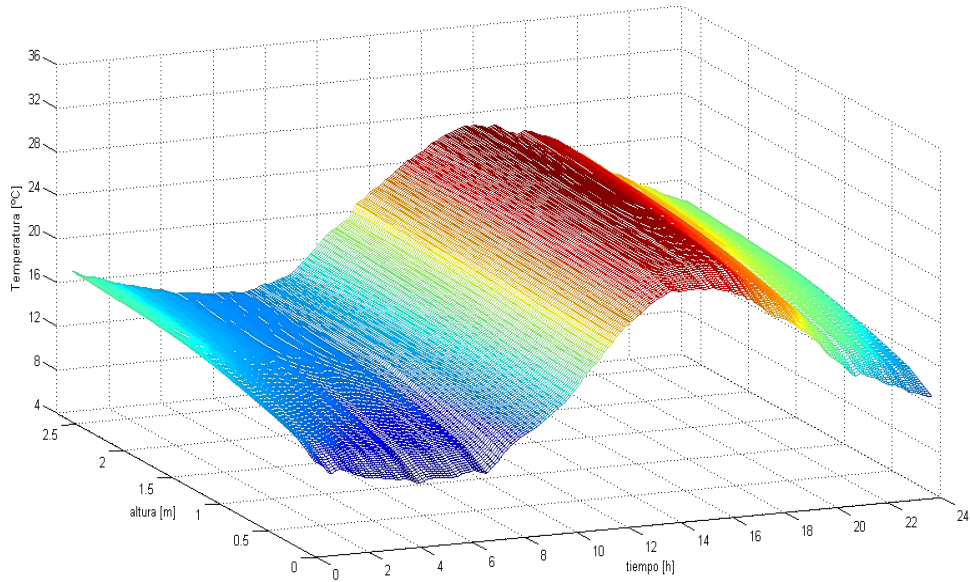
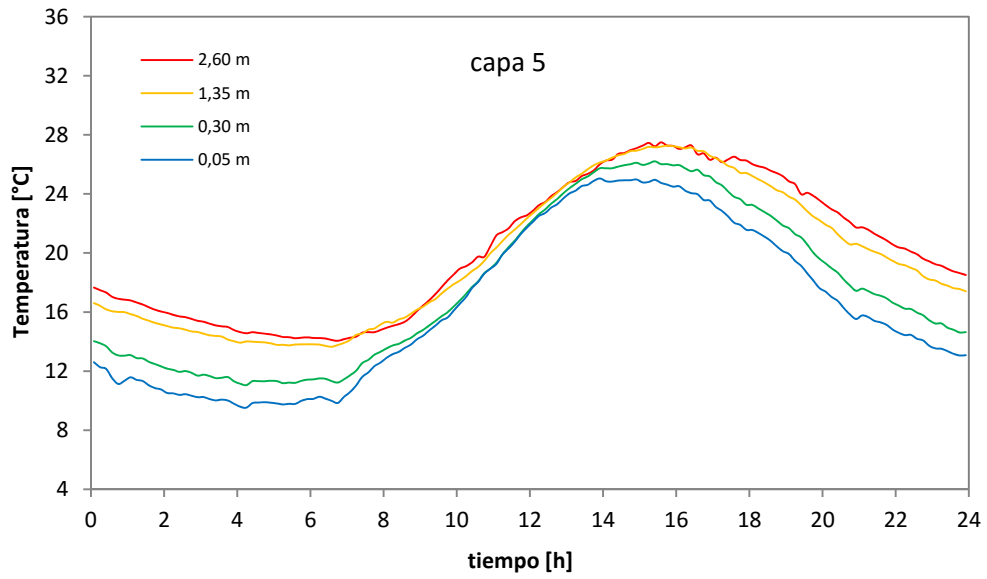


Figura 4.105 – Temperatura en la capa interior, capa 5, de la cámara ventilada en la fachada pesada

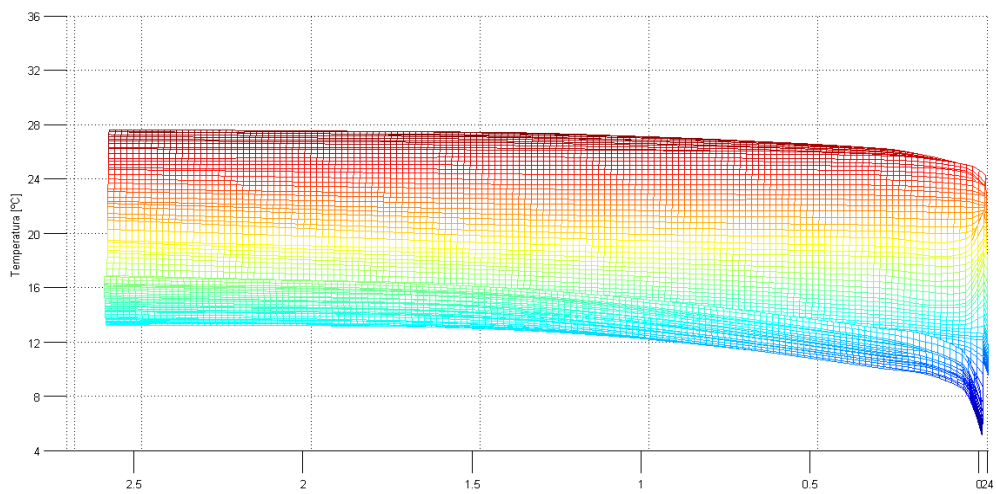
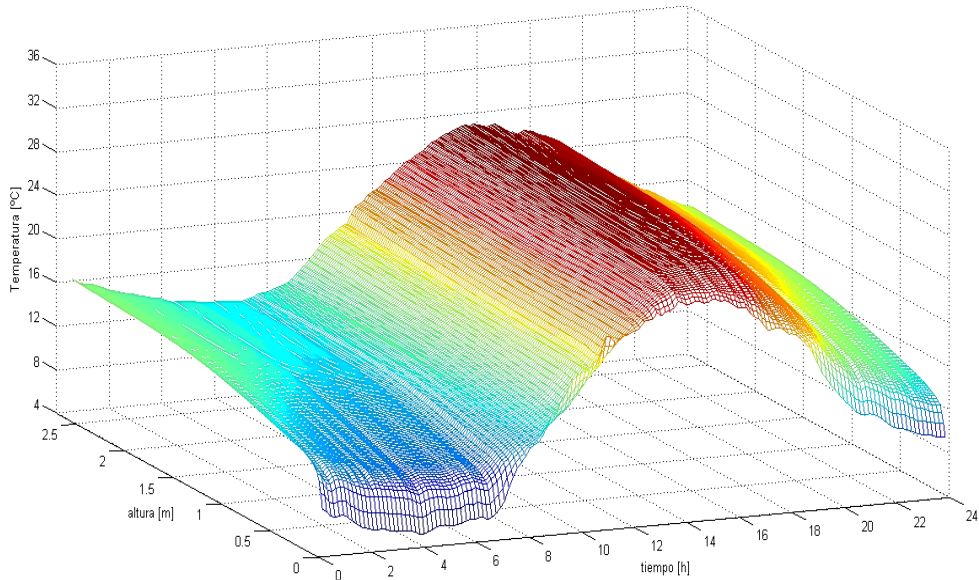
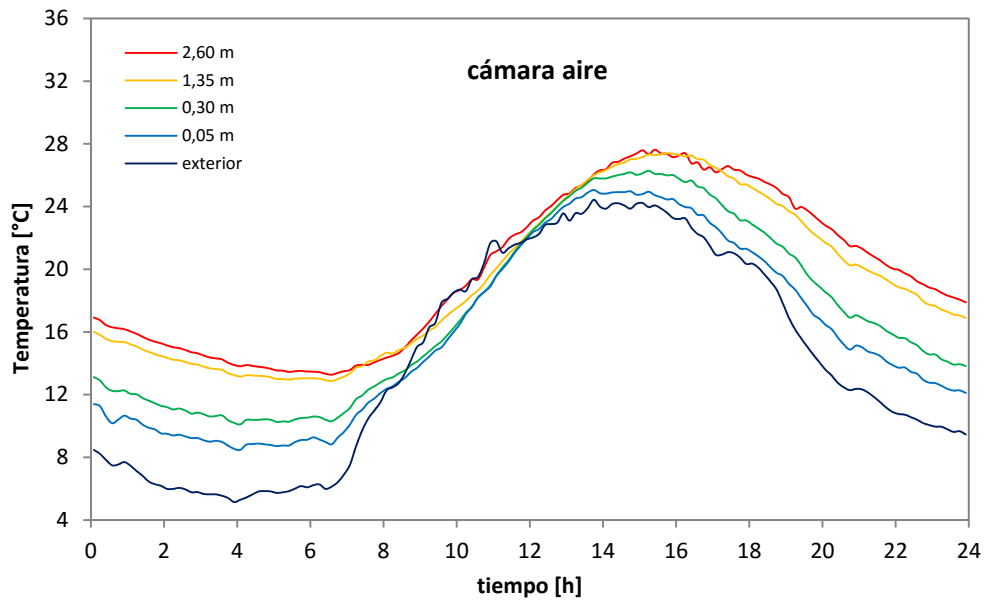


Figura 4.106 – Temperatura del aire en la cámara ventilada de la fachada pesada

El salto máximo de temperatura es de 6,3°C, 6,9°C y 6,7°C, para la *capa 5*, la *capa 6* y para el aire respectivamente, y se produce hacia la 20:30h, una vez superadas los valores máximos del día. Por tanto, el salto de temperaturas en la superficie de hormigón es incluso superior al que se produce en el aislante, debido a la alta inercia de la misma. Aunque los valores son muy próximos entre sí, y a su vez, cercanos al salto que se produce en el aire. Otro aspecto importante del salto de temperaturas dentro de la cámara ventilada, y que diferencia el comportamiento respecto a la fachada ligera, es que dicho salto se produce mayoritariamente en la zona de entrada. Las temperaturas en la zona central y superior están muy próximas entre sí, y separadas de las temperaturas de la zona inferior. A diferencia de lo que sucedía en la fachada ligera, en la que el gradiente de temperaturas es progresivo con la altura. Esto implica que la hipótesis de temperatura constante en las superficies que conforman la cámara ventilada pueda ser una aproximación más válida que en el caso de la fachada ligera. Y el último aspecto diferencial entre ambas fachadas es el retraso de la onda de calor. Mientras que en la fachada ligera el mínimo de temperatura se alcanza entre las 4h y las 6h, en la fachada pesada se desplaza hacia las 6h y 8h. Este desfase también se traslada, y de forma más notoria a la zona de máximos. Mientras que en la fachada ligera las temperaturas máximas se alcanzan entre las 12h y 14h, en la fachada pesada se alcanza entre las 14h y 16h. Por tanto, no sólo se desfasa en el tiempo, sino que además, es menos apuntado y su intervalo de duración es mayor. Este conjunto de características descritas implican un efecto importante en el comportamiento energético de ambas fachadas.

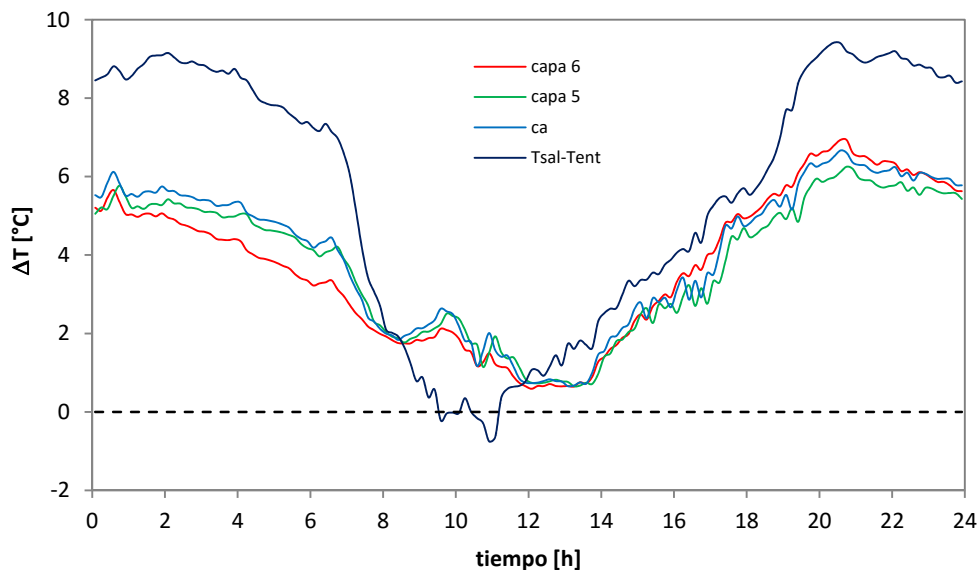


Figura 4.107 – Salto de temperaturas en las superficies y el aire de la cámara ventilada respecto al aire exterior en la fachada pesada

En la Figura 4.107 se muestra la evolución del salto de temperatura entre la parte superior e inferior de la cámara ventilada. Tanto las superficies como el aire presentan un salto positivo en todo momento, y de la misma magnitud. Y aunque, se da un pequeño periodo de tiempo, hacia las 11h, en el que el aire en la parte superior de la cámara ventilada está más frío que el aire exterior, no se llega a producir inversión del flujo de calor. Esto se debe a que el aire al entrar en la cámara ventilada se enfría con el contacto de la placa de hormigón de la hoja colgada. Esto muestra también un comportamiento muy diferente al de la fachada ligera. Esta diferencia de respuesta entre ambas fachadas ventiladas es más notoria si se compara el salto de temperaturas del aire respecto a la campana de radiación solar, ver Figura 4.108. Mientras que el pico de incidencia solar se produce hacia las 12h, la punta de velocidad se alcanza hacia las

20h, luego la inercia térmica de la hoja exterior desfasa el efecto de la ganancia solar 8h, trasladando el empuje de flotación hacia las horas de la tarde, y manteniendo el mismo durante las horas nocturnas, como se puede ver en la gráfica inferior, en la que se muestra el salto de temperaturas del aire respecto a la velocidad a media altura de la cámara ventilada. Salvo en el periodo de tiempo que va desde las 7h hasta las 11h, en el que se reduce el movimiento de aire, el resto del día se mantienen velocidades superiores a 0,2 [m/s] durante todo el día, incluidas las hora de la noche, donde se dan las temperaturas más bajas del aire exterior, y por tanto se maximiza el efecto refrigerante de la fachada.

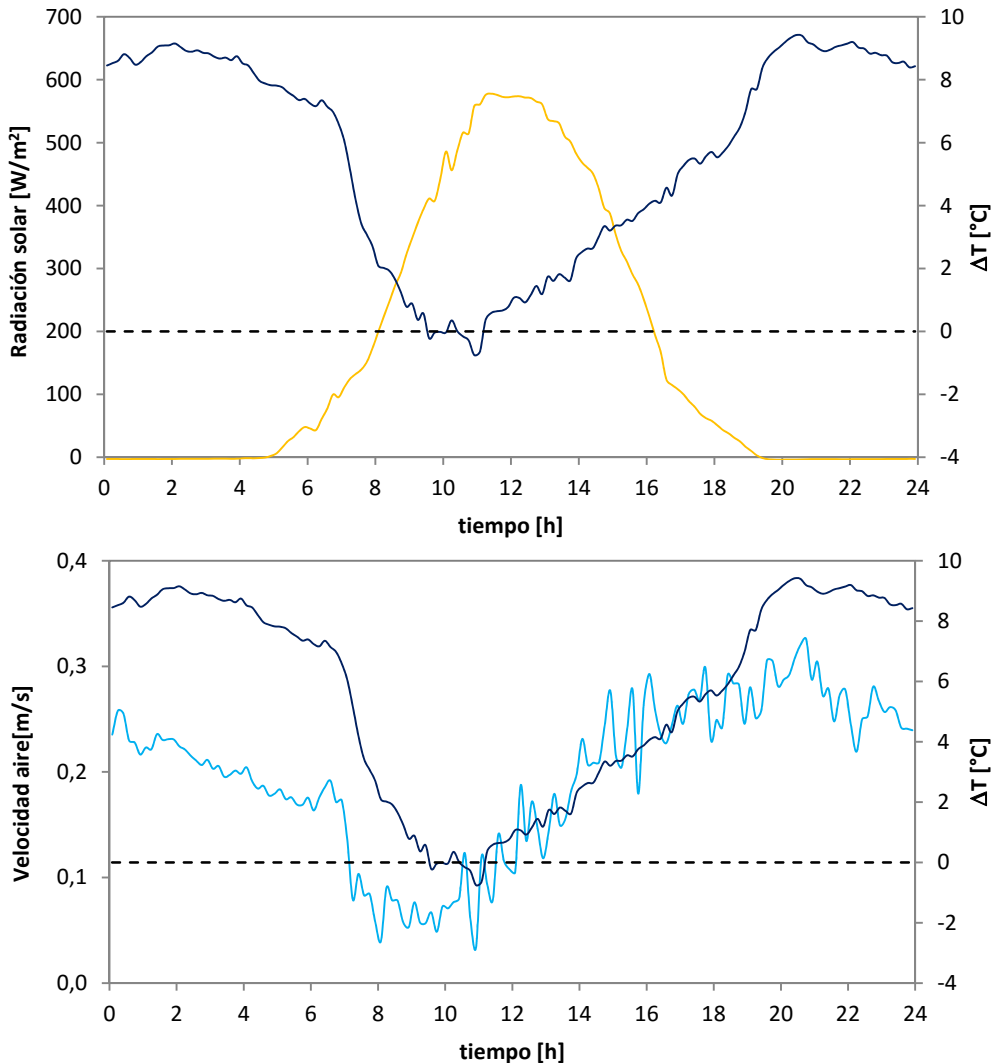


Figura 4.108 – Evolución del salto de temperatura del aire dentro de la cámara ventilada frente a la radiación solar y velocidad del aire en la fachada pesada

Para tener una idea más clara de estos efectos, en la Figura 4.109 se muestran los perfiles transversales de temperatura a lo largo de las diferentes capas a media altura de la muestra de fachada pesada y en diferentes instantes de tiempo a lo largo del día. En la gráfica inferior se muestran los perfiles verticales para el aire en los mismos instantes. En las curvas correspondientes a las 0h y a las 4h la temperatura mínima, dentro de la cámara de aire ventilada, se da en la superficie de hormigón, siendo la superficie del aislante el punto más caliente. Además, el salto de temperatura entre las dos caras de la hoja de hormigón es inferior a 5°C. Pero sin embargo, existe un gradiente importante entre la entrada y la salida para el aire de la cámara. En los

perfiles de las 8h a las 12h, se produce una rápida subida de la temperatura de la superficie exterior de la hoja de hormigón, pero la cara interior de la misma sigue siendo el punto más frío de la cámara ventilada. Se da un salto de temperatura de más de 15°C entre las dos superficies de la hoja de hormigón. Durante este periodo se reduce el gradiente en altura para el aire. A partir de la 14h, la superficie interior de la hoja de hormigón pasa a ser el punto más caliente dentro de la cámara, y mantiene esta condición el resto del tiempo, aunque la temperatura de la cara exterior descienda rápidamente. Esto genera de nuevo un gradiente en el aire de la cámara, que se mantiene el resto del tiempo.

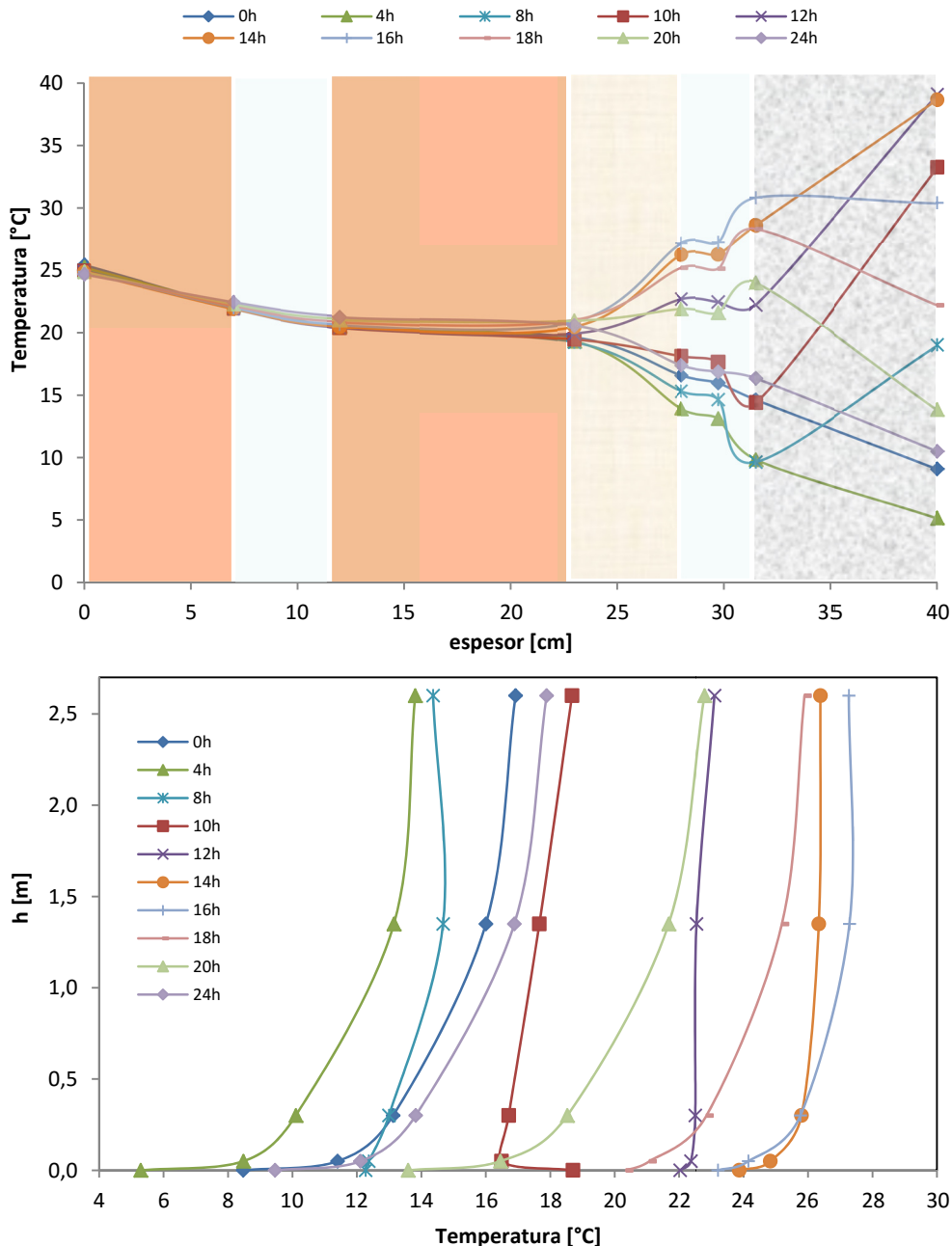


Figura 4.109 – Perfiles temperatura en la muestra de fachada ventilada pesada a lo largo del día 18 de mayo

Centrando la atención únicamente en la cámara de aire, en la superficie de la Figura 4.110 se muestra la evolución en función del tiempo del perfil de temperaturas a media altura de la probeta. Dicho perfil no tiene la forma parabólica que presentaba la

fachada ligera, sino que la temperatura del aire se aproxima, en mayor medida, a la temperatura de la superficie del aislante. También se puede observar el desplazamiento de los máximos de temperatura hacia las horas de la tarde, y como el calor acumulado en la hoja de hormigón mantiene un gradiente de temperaturas en las horas finales del día. Este comportamiento es muy diferente al que se observa en la fachada ligera, en la que la superficie de la Figura 4.85 muestra un comportamiento más simétrico respecto al eje de tiempos. Para completar el análisis del comportamiento en temperaturas de la cámara ventilada, en la superficie de la Figura 4.111 se muestra el perfil en altura para un instante dado, el correspondiente a las 16h. Este es el momento en el que se alcanzan las máximas temperaturas. La forma del perfil de temperaturas se mantiene a lo largo de la altura, con el valor máximo en la superficie de hormigón, decayendo rápidamente hasta la temperatura del aire en el punto medio de la cámara, que se aproxima al valor de la superficie del aislante.

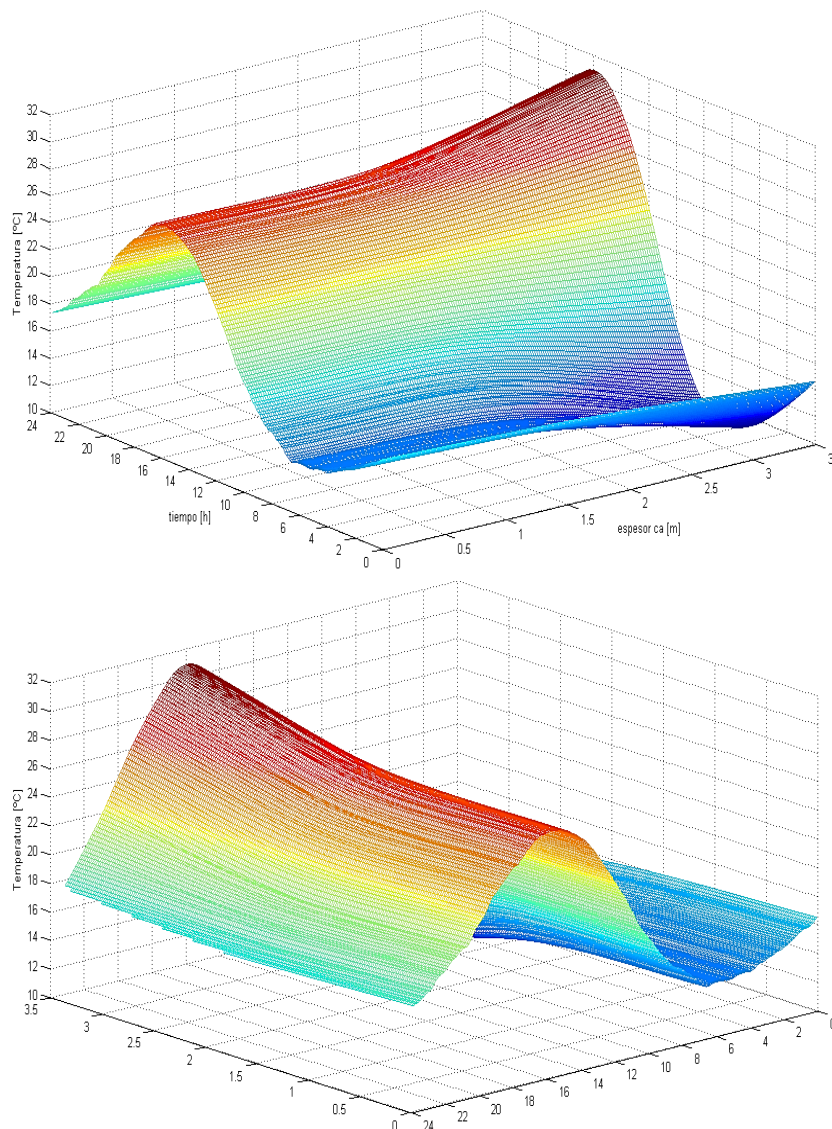


Figura 4.110 – Evolución del perfil de temperaturas en el punto central de la cámara ventilada a lo largo del día para la fachada pesada

La forma del perfil de temperaturas también es muy diferente al que se genera en la fachada ligera, ver Figura 4.86, en la que la forma del perfil va evolucionando con la altura, y sobre todo, se ve muy afectado en la zona de entrada. En cuanto a las

velocidades de aire dentro de la cámara, en la Figura 4.112 se muestran las medidas obtenidas en función de la altura junto con los perfiles en diferentes instantes del día. A diferencia de la fachada ligera, en la que se producía una aceleración del aire durante las horas centrales del día, alcanzando un valor máximo, para frenarse durante las horas nocturnas, el movimiento del aire dentro de la fachada pesada es mucho más constante. Desde las 0h hasta las 7h se mantiene unas velocidades medias del orden de 0,2 [m/s], debido al calor acumulado por la hoja de hormigón. Entre las 7h y las 11h se produce un parón, debido a que se igualan las temperaturas del aire dentro de la cámara ventilada frente al aire exterior. Entre las 11h y las 16h se produce la aceleración del aire hasta alcanzan valores del orden de los 0,3 [m/s], que se mantienen hasta el final del día.

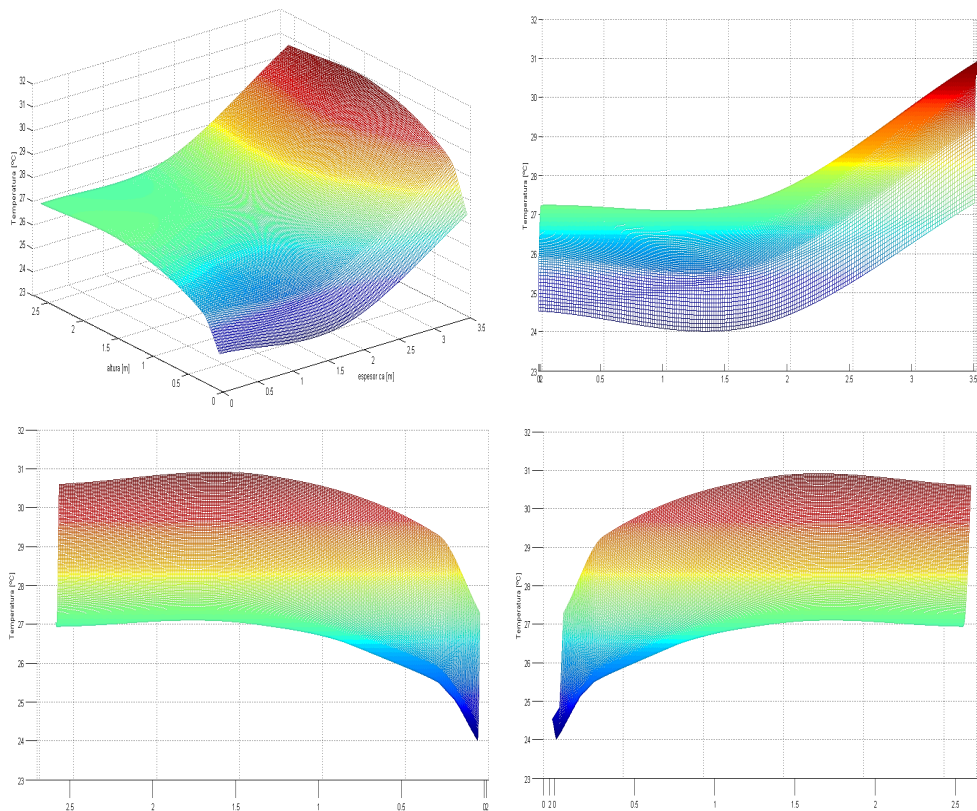


Figura 4.111 – Evolución del perfil de temperaturas en altura en la cámara ventilada para las 16h en la fachada pesada

En cuanto a los perfiles en altura, también se da un comportamiento muy divergente entre ambas fachadas ventiladas. Mientras que en la fachada ligera se alcanzaba un máximo a 0,3 [m], luego se reducía la velocidad para posteriormente volver a acelerarse con la altura, en la fachada pesada el punto máximo de velocidad se da en la entrada de la cámara, a los 0,05 [m], y posteriormente, el perfil de velocidades es prácticamente continuo, sin variaciones representativas de la velocidad con la altura. Esta diferencia de comportamiento está muy influenciada por la configuración de la geometría de entrada de la cámara ventilada. En la fachada pesada, los 8,5 [cm] de espesor de la hoja colgada de hormigón genera una embocadura que acelera el aire a la entrada de la cámara. Sin embargo, este estrechamiento no existe en la configuración de la fachada ligera, en la que el espesor de la hoja de cemento es de tan solo 1,5 [cm], y el aire accede directamente a la cámara ventilada. Se puede obtener una imagen más clara del comportamiento del aire dentro de la cámara ventilada en la superficie de velocidades del aire respecto al tiempo, mostrada en la Figura 4.113. Es clara la diferencia con la superficie de velocidades de la fachada ligera, ver Figura 4.88.

Una vez evaluado el comportamiento en temperaturas y velocidades, el análisis de la fachada se completa con las medidas de pérdidas de carga. En la Figura 4.114 se muestran las tres señales de presión diferencial que se registran durante el ensayo. Hay que recordar que la pérdida de carga en la entrada está indicada en signo negativo respecto al resto de presiones, para poder obtener una mejor imagen del comportamiento. Para complementar el análisis se muestran las curvas de velocidad exterior del aire y de la velocidad dentro de la cámara ventilada, a media altura. Se puede ver como las pérdidas de cargas tienen un comportamiento homogéneo, como era de esperar, al existir una velocidad más o menos constante durante todo el día, sin grandes aceleraciones. También se puede ver, como la velocidad del aire exterior genera perturbaciones en las presiones interiores, pero sin grandes efectos sobre el valor medio.

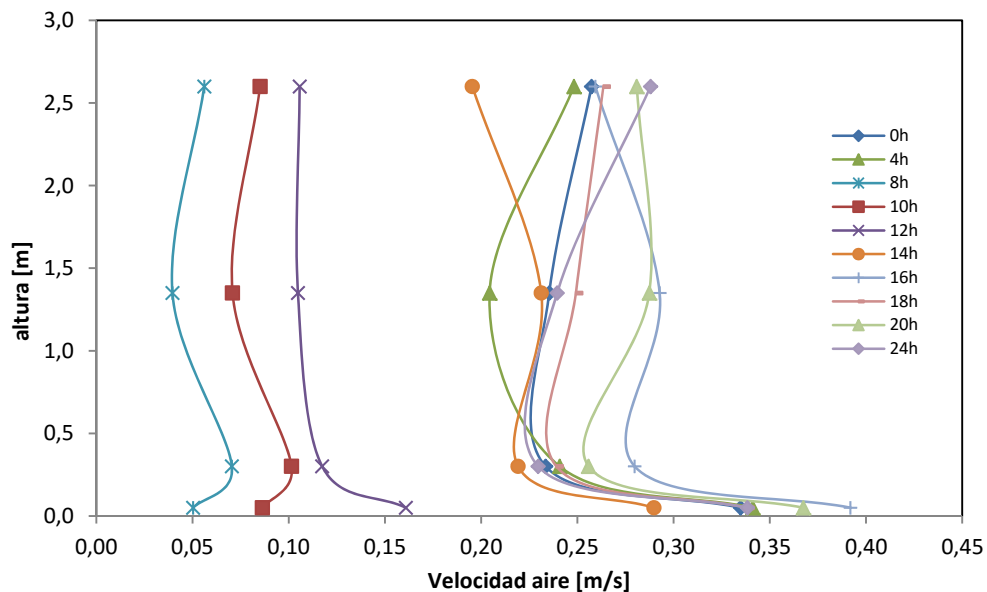
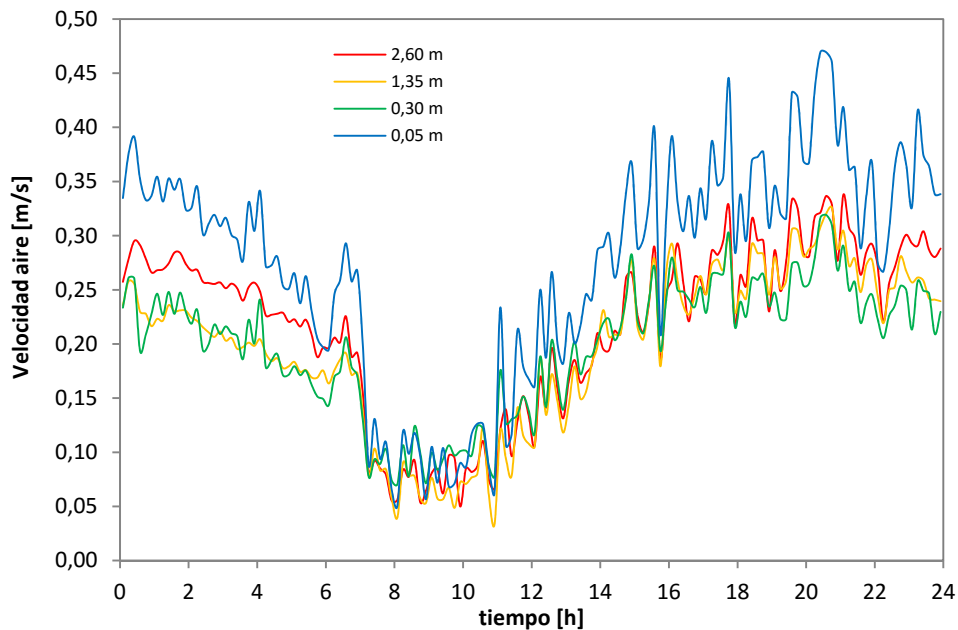


Figura 4.112 – Velocidad del aire dentro de la cámara ventilada en función de la altura a lo largo del día 18 de mayo en la fachada pesada

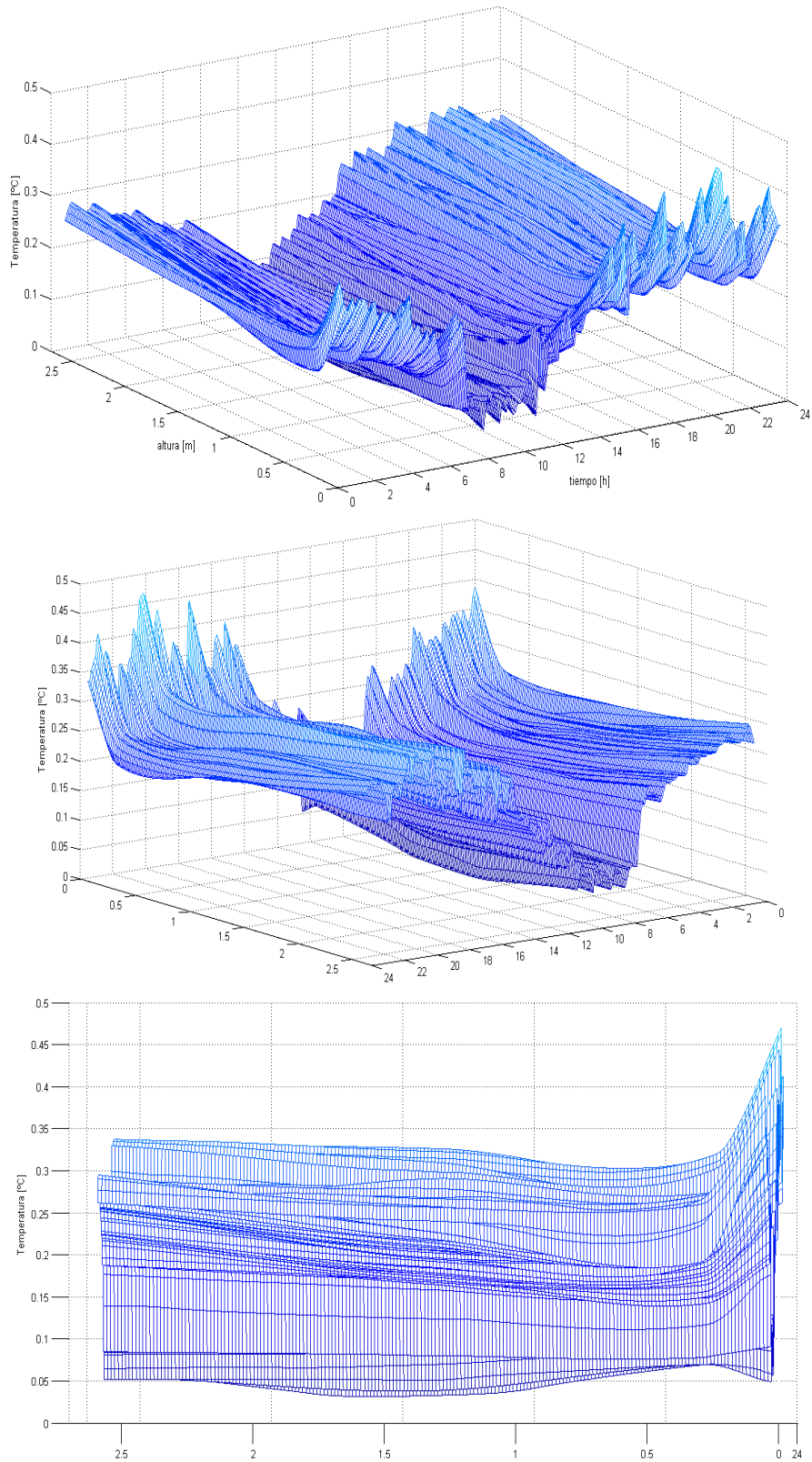


Figura 4.113 – Evolución del perfil de velocidades en altura en la cámara ventilada para el día 16 de mayo

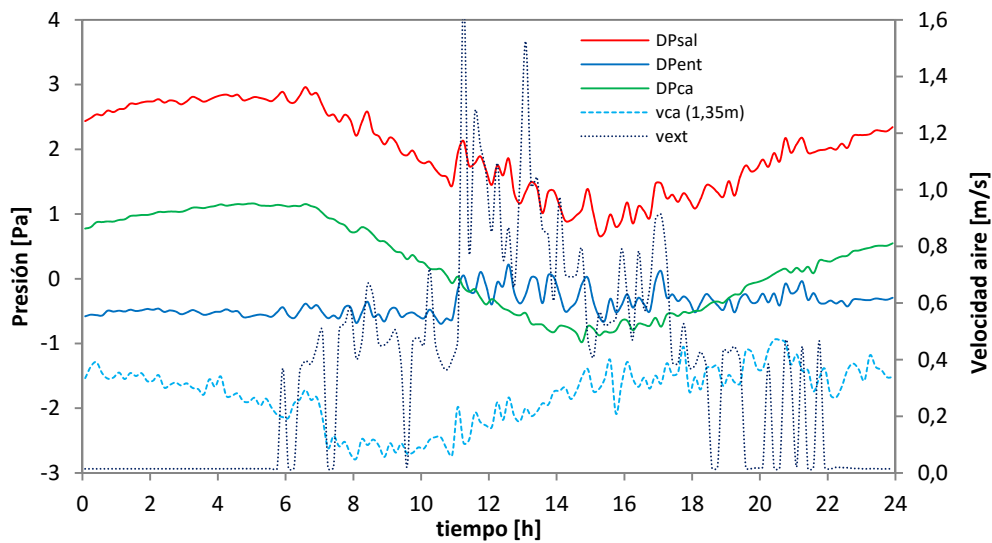


Figura 4.114 – Evolución de las presiones dentro de la cámara ventilada para el día de referencia

Las dos muestras ensayadas presentan un movimiento de aire libre, por convección natural. Esta es la configuración más extendida en el sector de la edificación. Como contraste, a continuación se muestran los resultados del ensayo del sistema de fachada forzada, en la cual se actúa sobre el movimiento de aire dentro de la cámara ventilada.

4.2.4 Fachada ventilada forzada

En el caso de la fachada forzada el periodo de ensayo va desde el 16 de noviembre hasta el 7 de enero, y se aplican las rutinas *ROLBS*, *PRBS* y *PULSO*, de forma secuencial. Durante todo el periodo se impone un caudal de extracción, generado por la soplante, del orden de 55 [l/s]. Como intervalo de modelado se emplea el correspondiente a la rutina *ROLBS*, que va desde el 16 de noviembre hasta el 1 de diciembre; el resto del ensayo se recoge en el *Anexo C*.

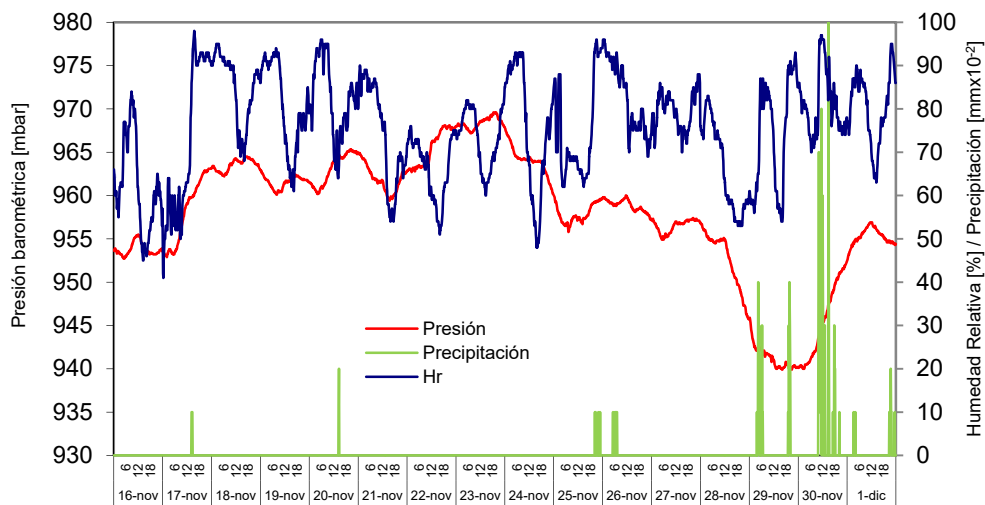


Figura 4.115 – Condiciones ambientales durante el ensayo de la fachada ventilada forzada durante el periodo de modelado

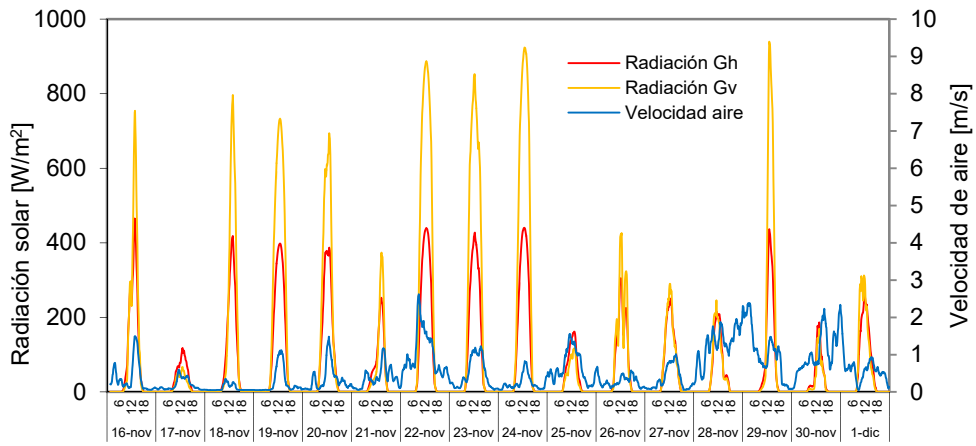


Figura 4.116 – Radiación solar y velocidad de viento durante el ensayo de modelado de la fachada ventilada forzada

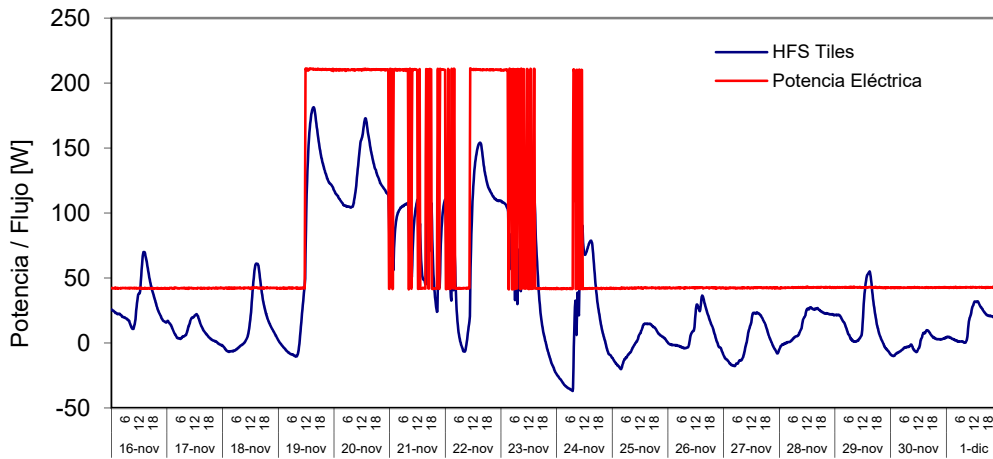


Figura 4.117 – Potencia introducida y flujo de calor de la envolvente de la sala de ensayos para la fachada ventilada forzada

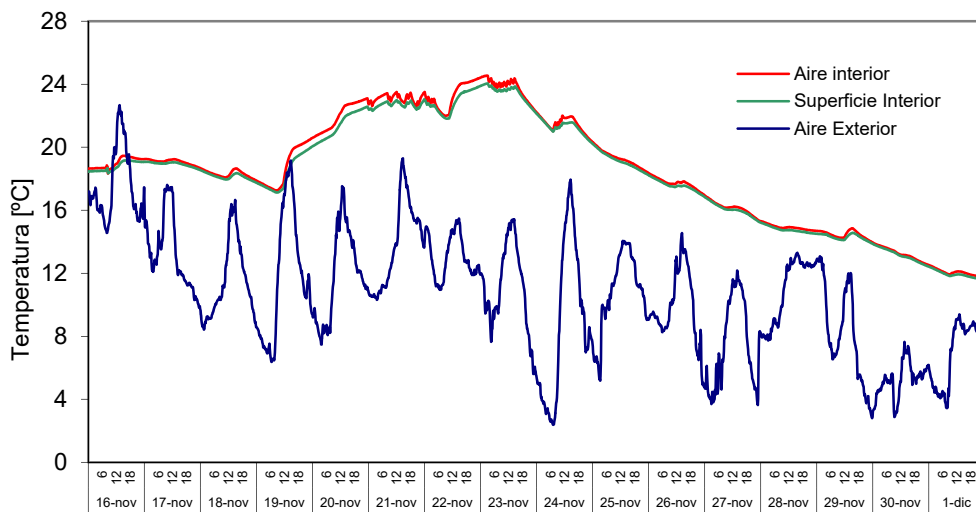


Figura 4.118 – Temperatura de la sala de ensayos y ambiental para la fachada ventilada forzada

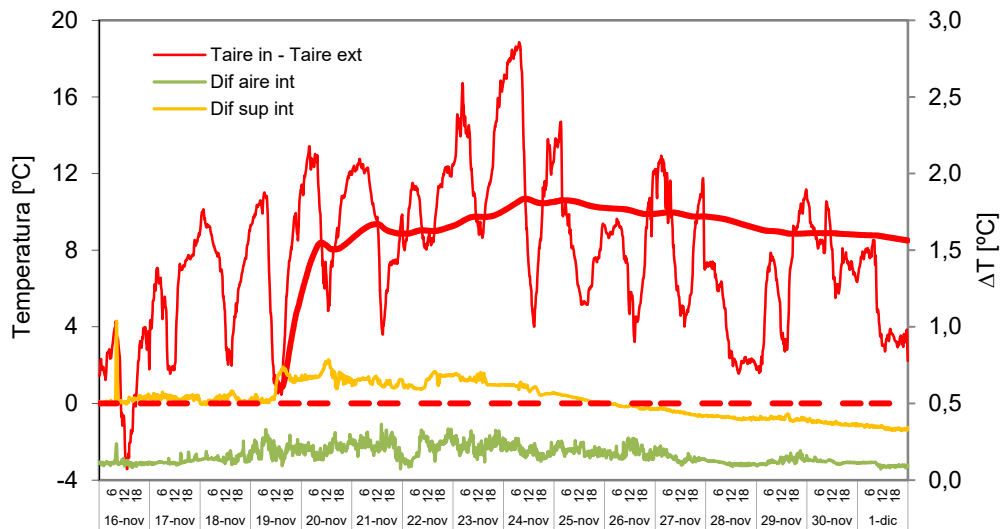


Figura 4.119 – Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada forzada

En la Figura 4.118 y Figura 4.119 se muestran las condiciones interiores de la sala de ensayos respecto a la temperatura de ambiente exterior. Tanto las temperaturas de aire como de superficie de la sala de ensayos presentan las condiciones de homogeneidad adecuadas para los estándares del ensayo *PASLINK*. En este caso, al trabajar con una potencia de calefacción pequeña, del orden de 220 [W], el salto de temperaturas entre ambientes toma un valor medio de 10°C durante el periodo de excitación, algo inferior al óptimo, pero al presentar la muestra menos resistencia térmica, el flujo intercambiado es suficiente para su adecuada caracterización mediante las herramientas de identificación.

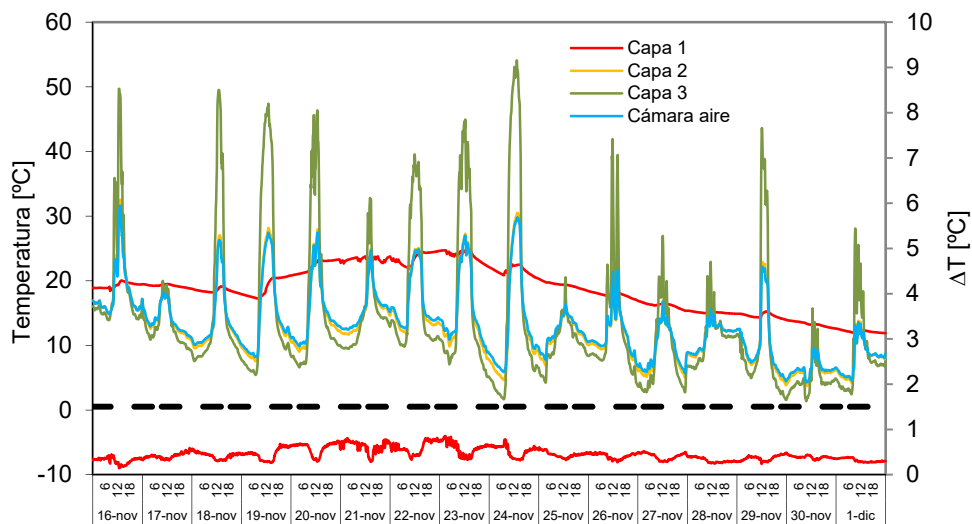


Figura 4.120 – Temperaturas en la probeta de fachada ventilada forzada

Una vez analizadas las condiciones de la celda se pasa a estudiar el comportamiento propio de la muestra. En la Figura 4.120 se recogen las temperaturas medias de cada una de las capas de la probeta y la temperatura de la cámara de aire ventilada. Se puede apreciar el salto de temperaturas entre la superficie interior de la muestra, *capa 1*, que sigue el comportamiento de la sala de ensayos, y presenta homogeneidad de temperaturas en toda la superficie, con diferencias inferiores a 1°C.

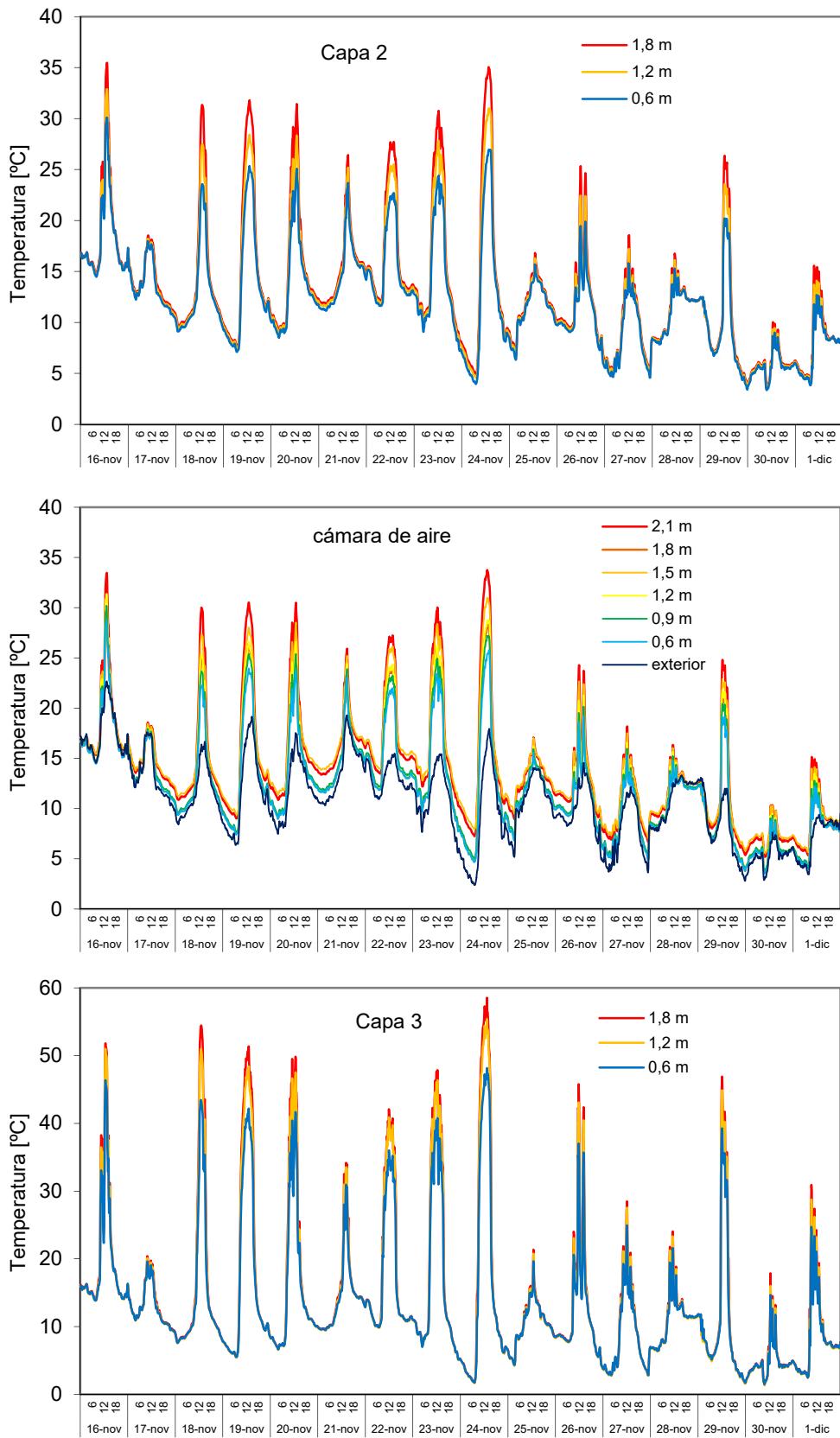


Figura 4.121 –Temperatura en función de la altura en el eje central de la cámara ventilada en la probeta de fachada forzada

En el resto de capas su evolución sigue a las condiciones exteriores, principalmente, a la campana de radiación solar. En cuanto a la cámara de aire y las dos superficies que la conforman, el conjunto de puntos de medida se muestran en la Figura 4.121. Se puede ver que la temperatura del aire está más próxima en todo momento a la temperatura de la *capa 2*, la superficie del panel sándwich, que a la temperatura de la hoja exterior de chapa. Esta hoja, *capa 3*, alcanza las máximas temperaturas del conjunto de la probeta, con sobrecalentamientos de más de 20°C respecto al resto de capas. En este caso, se mantienen los gradientes de temperatura respecto a la altura en las dos superficies de la cámara de aire, alcanzando diferencias de hasta 8°C para la superficie del panel sándwich y de hasta 10°C en la chapa exterior, ver gráfica superior de la Figura 4.122.

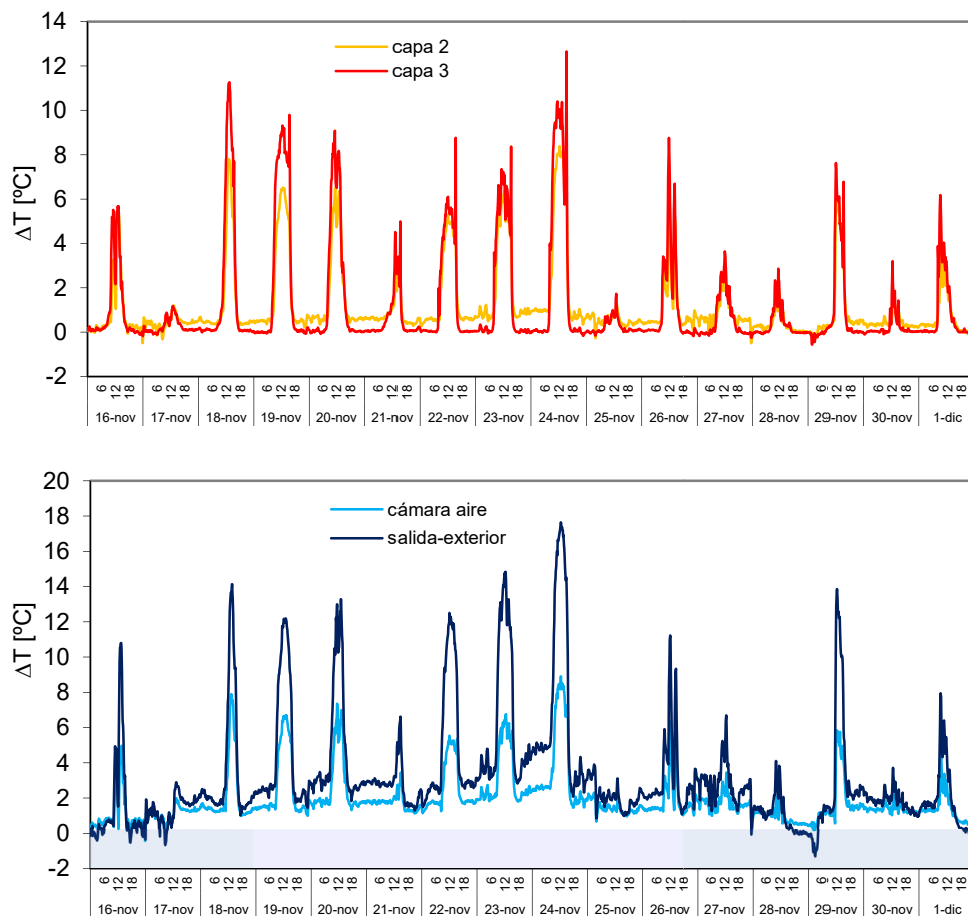


Figura 4.122 – Diferencia de temperatura entre la parte inferior y superior para las dos superficies y el aire de la cámara ventilada para la fachada forzada

Al tratarse de una muestra configurada con materiales de poca inercia y alta conductividad, se dan gradientes superiores a los obtenidos en las otras muestras de fachada ventilada ensayadas, pero concentradas en los momentos de incidencia solar. El resto de tiempo, la homogeneidad de temperaturas es alta, gracias en gran medida a la convección forzada. En cuanto a la evolución de la temperatura del aire en la cámara ventilada, en la entrada se sigue produciendo el mayor calentamiento, con un salto de temperaturas del orden de 10 °C respecto al aire exterior y un aumento de tan solo 8°C durante el resto de desarrollo de la cortina de aire a largo de la altura de la probeta, ver gráfica inferior de la Figura 4.122. También se puede apreciar cómo la diferencia de temperaturas siempre es positiva entre la zona superior de la cámara ventilada y la zona inferior, ya que, como es obvio, no se producen reflujos debido al movimiento

forzado. En cuanto a la homogeneidad de temperaturas en la sección horizontal de la muestra, en la Figura 4.123 se muestra el salto medido por la termopila respecto al salto medido por las sondas situadas en el eje central de la muestra. Las diferencias entre ambas curvas son inferiores a los 2°C, en todo momento, por lo que se puede considerar que el efecto de los bordes del portamuestras no son relevantes y que el comportamiento de la cámara ventilada se aproxima de forma adecuada al modelo bidimensional. En cuanto al movimiento de aire, en la Figura 4.124 se muestra el caudal impulsado por la soplante y la velocidad medida por el termoanemómetro en el punto central. El caudal base impuesto, en condiciones nominales, es de 55 [l/s], pero se aprecia que durante los periodos de incidencia solar se produce un aumento de caudal, del orden de 6 [l/s], lo que representa un aumento del 10%. Luego a la convección forzada se suma una componente de convección natural que tiene un efecto representativo en el movimiento de aire dentro de la cámara ventilada. En cuanto a la velocidad, el valor que se obtiene es de 0,35 [m/s] con una oscilación media de $\pm 0,05$ [m/s].

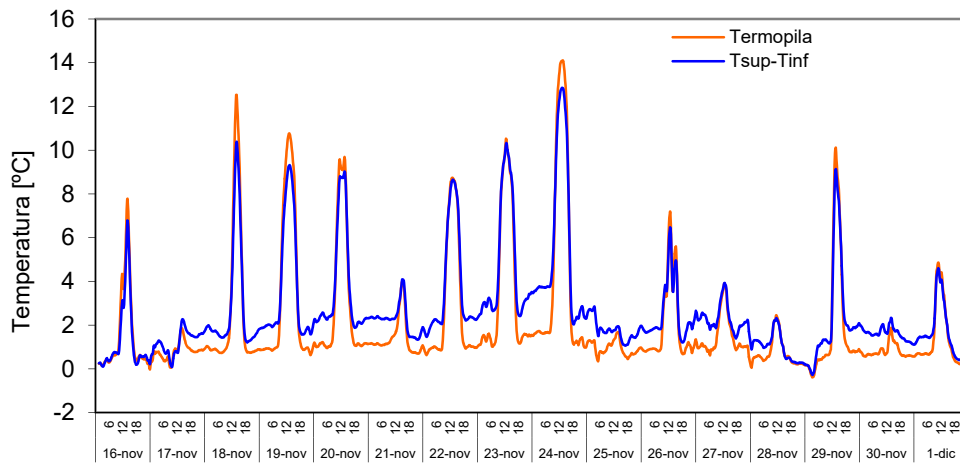


Figura 4.123 – Salto de temperatura en la cámara de aire ventilada medido por la termopila y por las sondas instaladas en el eje central de la muestra

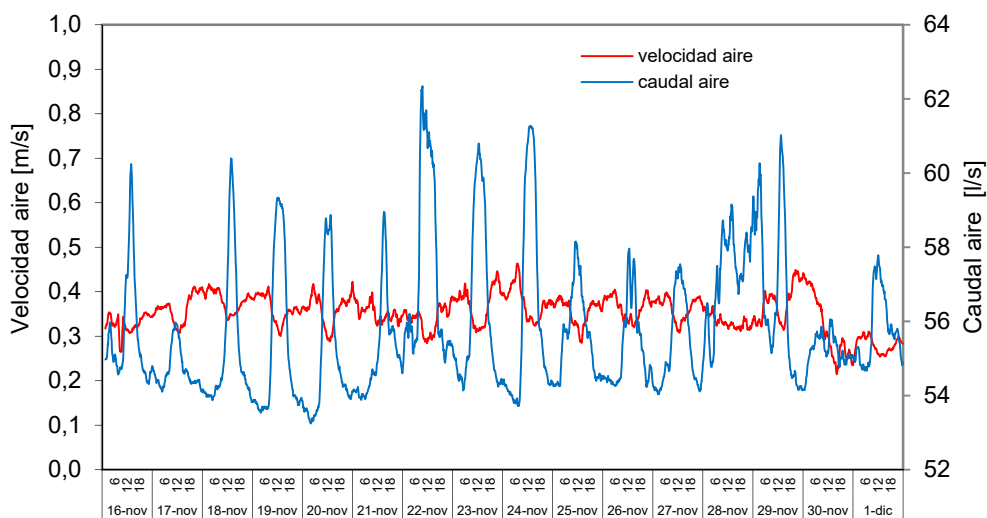


Figura 4.124 – Caudal de aire circulante por la cámara ventilada y velocidad de aire en el punto central de la muestra

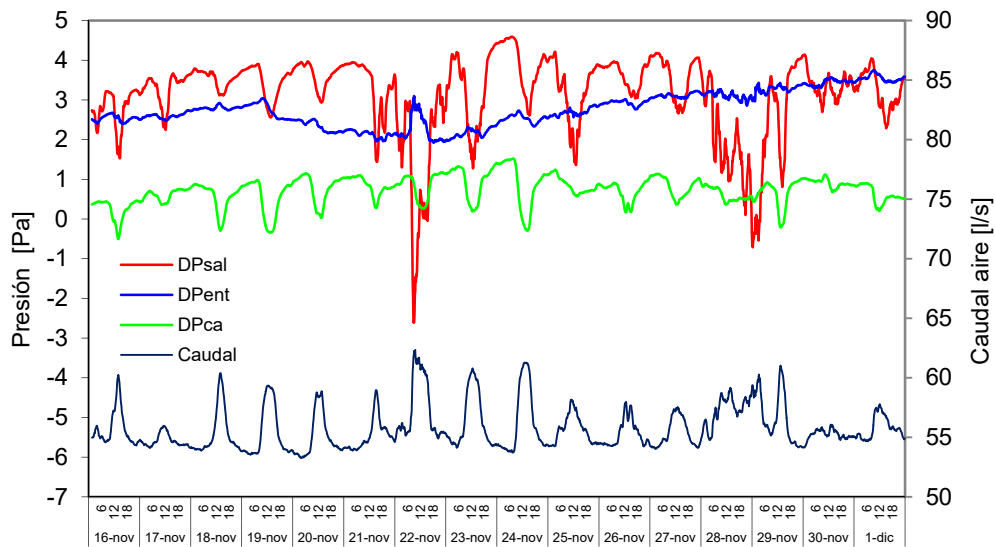


Figura 4.125 – Caída de presión en la fachada forzada y caudal de aire circulante por la cámara ventilada

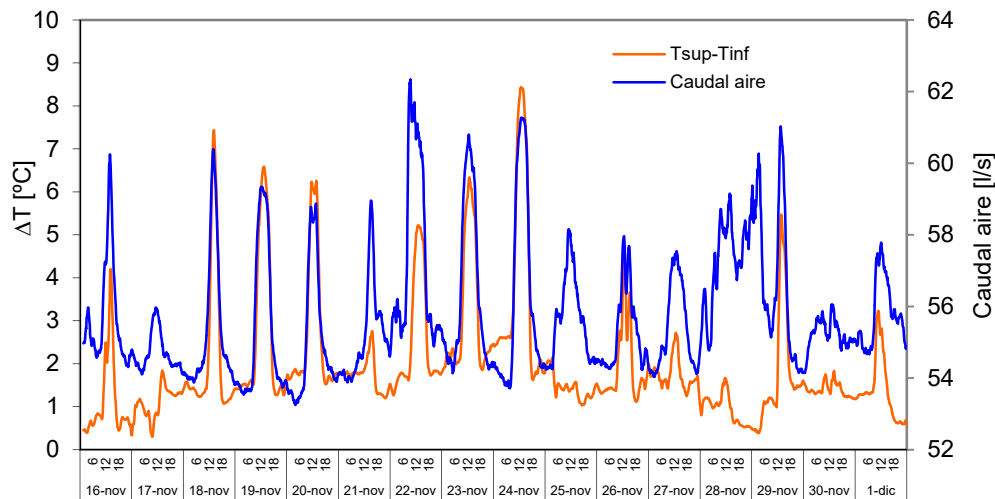


Figura 4.126 – Salto de temperatura entre entrada y salida y caudal de aire circulante cámara ventilada

En cuanto a la evolución de la caída de carga en el movimiento de aire a lo largo de la cámara ventilada, en la Figura 4.125 se muestran las diferencias de presión que se produce en la probeta para la zona de entrada, a lo largo de la fachada, y en la zona de salida. Se observa que la caída de presión en la entrada es prácticamente constante y la variación de presión a lo largo de la cámara y en la salida oscilan en función de la componente añadida de convección natural. Mediante estos datos se puede detectar que durante tres días, el 22, 28 y 29 de noviembre, el efecto de la velocidad de aire exterior ha tenido repercusión en el movimiento de aire dentro de la fachada. Este efecto del viento en la cámara ventilada se puede apreciar con más detalle en la gráfica de la Figura 4.126 donde se compara el salto de temperaturas entre la parte inferior de la cámara y la parte superior respecto al caudal de aire. Se observa cómo los picos de aumento de caudal son proporcionales y se solapan perfectamente con los periodos en los que se produce calentamiento efectivo del aire, efecto de la convección natural, salvo en los tres días indicados. En estos periodos se produce un aumento de caudal mayor del esperado e incluso sin existir calentamiento del aire. Una vez evaluados los datos generales, para obtener una imagen más clara del comportamiento de la fachada forzada, se pasa a estudiar con más detalle un día representativo, en este caso el correspondiente al 19 de noviembre. En la Figura 4.127 se muestran las temperaturas

de las dos superficies que conforman la cámara ventilada, en el eje central de la muestra, y para las diferentes alturas. Respecto a las otras dos muestras de fachada ventiladas ensayadas, el comportamiento de temperaturas es muy diferente.

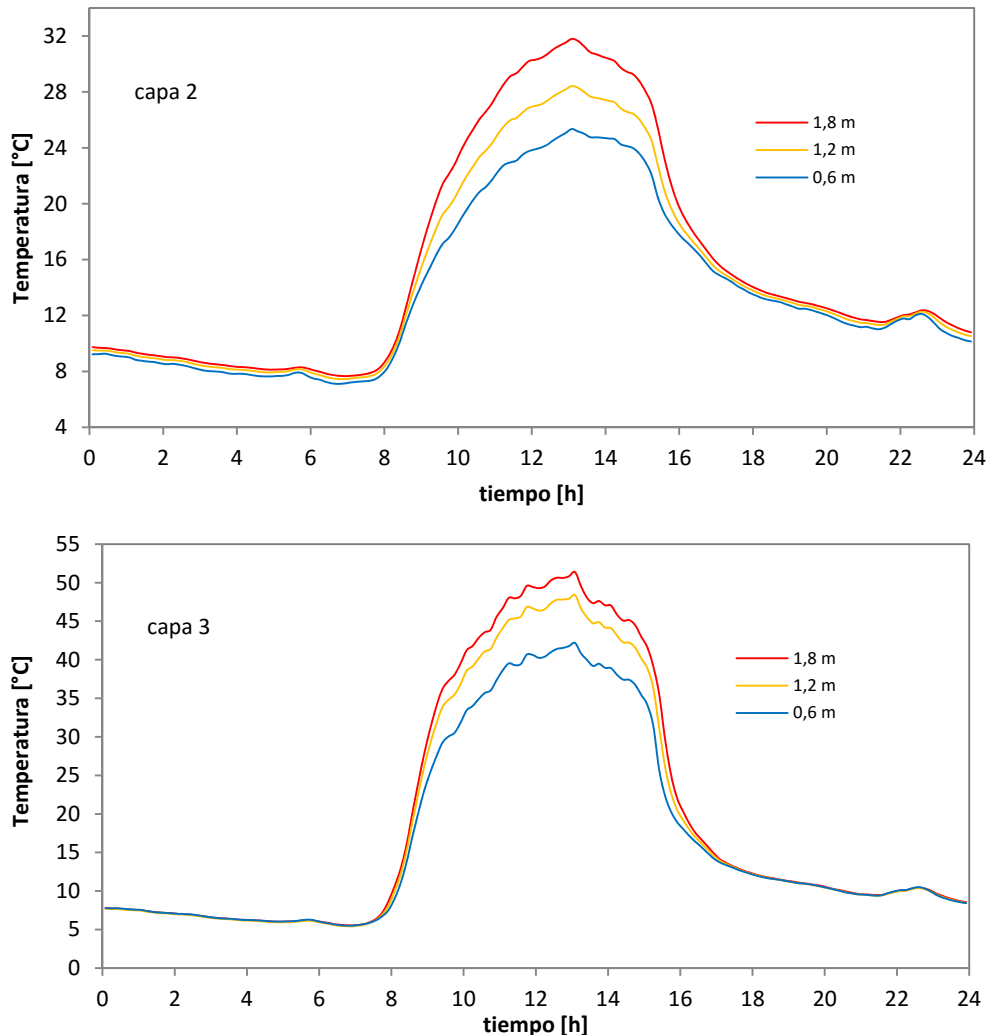


Figura 4.127 – Temperatura en la superficie exterior, *capa 3*, y en la superficie interior, *capa 2*, de la cámara ventilada de la fachada forzada

En primer lugar, debido a la poca inercia de los materiales, las temperaturas de las superficies son muy homogéneas durante los periodos sin incidencia solar y sin embargo, presentan grandes gradientes durante los periodos de soleamiento. Otro comportamiento diferenciador, es el intercambio radiativo de onda larga entre ambas superficies. En las probetas anteriores, la diferencia de temperatura entre superficies es relativamente pequeña, debido a que la ganancia solar que experimenta la hoja exterior se transmite por radiación a la superficie interior, formada por el aislamiento térmico, equilibrando las temperaturas de ambas caras de la cámara ventilada. En este caso, la hoja exterior alcanza temperaturas del orden de los 50°C, y en cambio, la hoja interior no supera valores de 32°C. Esto se puede explicar si ambas superficies presentan una emisividad inferior a la que tenían las otras muestras de fachada ventilada, o una mayor reflexión. Esto concuerda con las propiedades de los materiales metálicos que configuran las distintas capas de la probeta. Respecto a las temperaturas del aire dentro de la cámara ventilada, en este ensayo se dispone de más información que en los anteriores, gracias al aumento de sondas en altura.

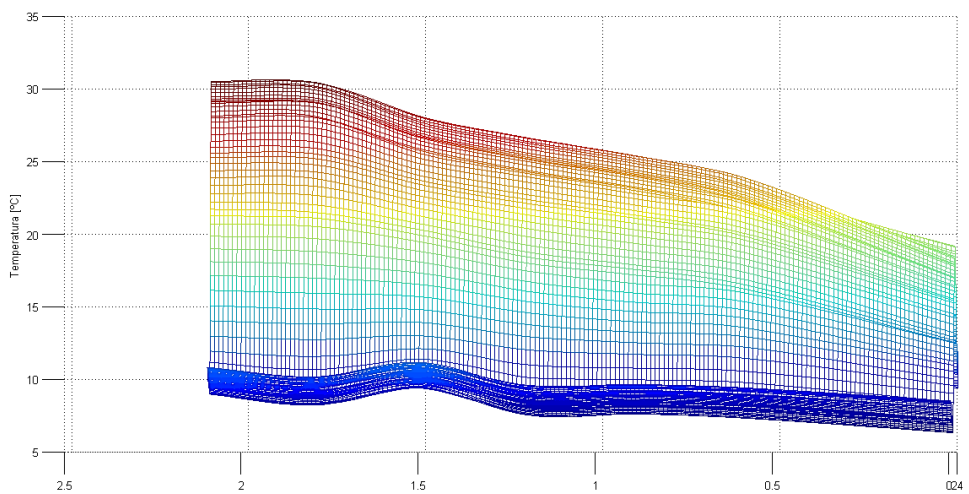
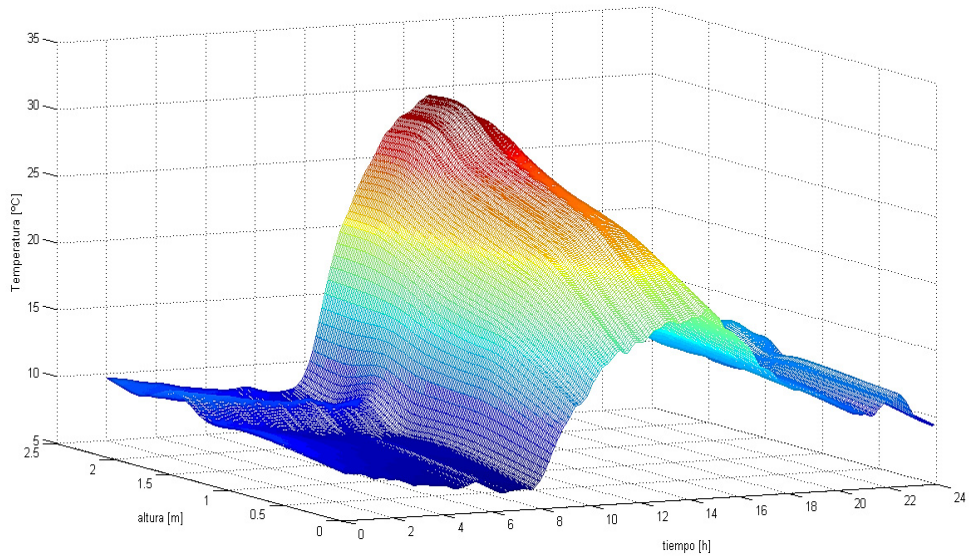
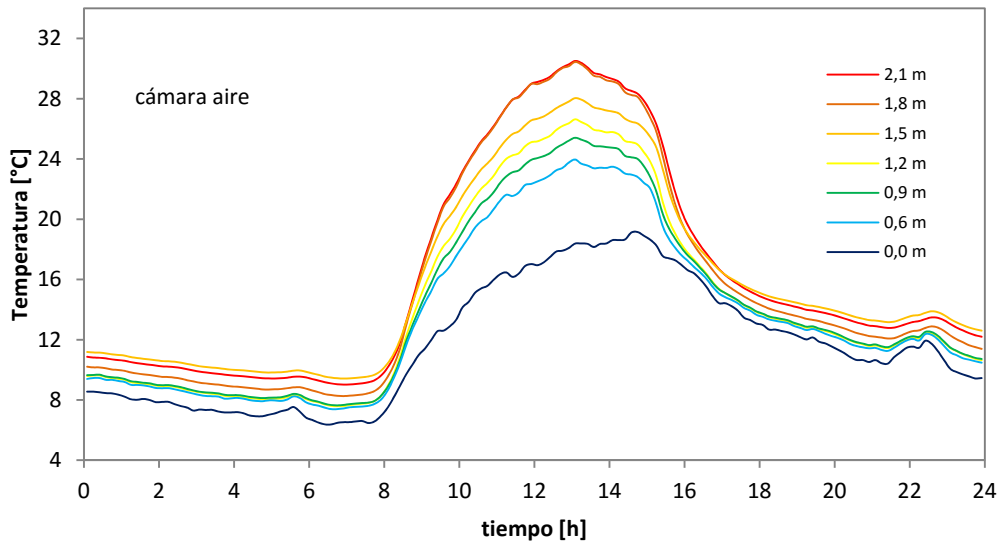


Figura 4.128 – Temperatura del aire en la cámara ventilada de la fachada forzada

En la Figura 4.128 se muestra la evolución a lo largo del día de referencia, y las superficies respecto al eje de tiempos. Se puede ver que la temperatura del aire se aproxima más a la temperatura de la superficie interior, superficie del panel sándwich. También se observa en la Figura 4.128 que el proceso del calentamiento del aire se puede dividir en tres zonas, la zona de entrada, primeros 0,5 [m], donde el aire experimenta un incremento rápido de 5°C, la zona central, entre 0,5 a 1,5 [m], donde se produce un incremento lineal de otros 4°C, y la parte final, 1,5 a 2,1 [m], donde se produce un aumento brusco de la temperatura de 3°C, debido a efecto de las tolvas de extracción.

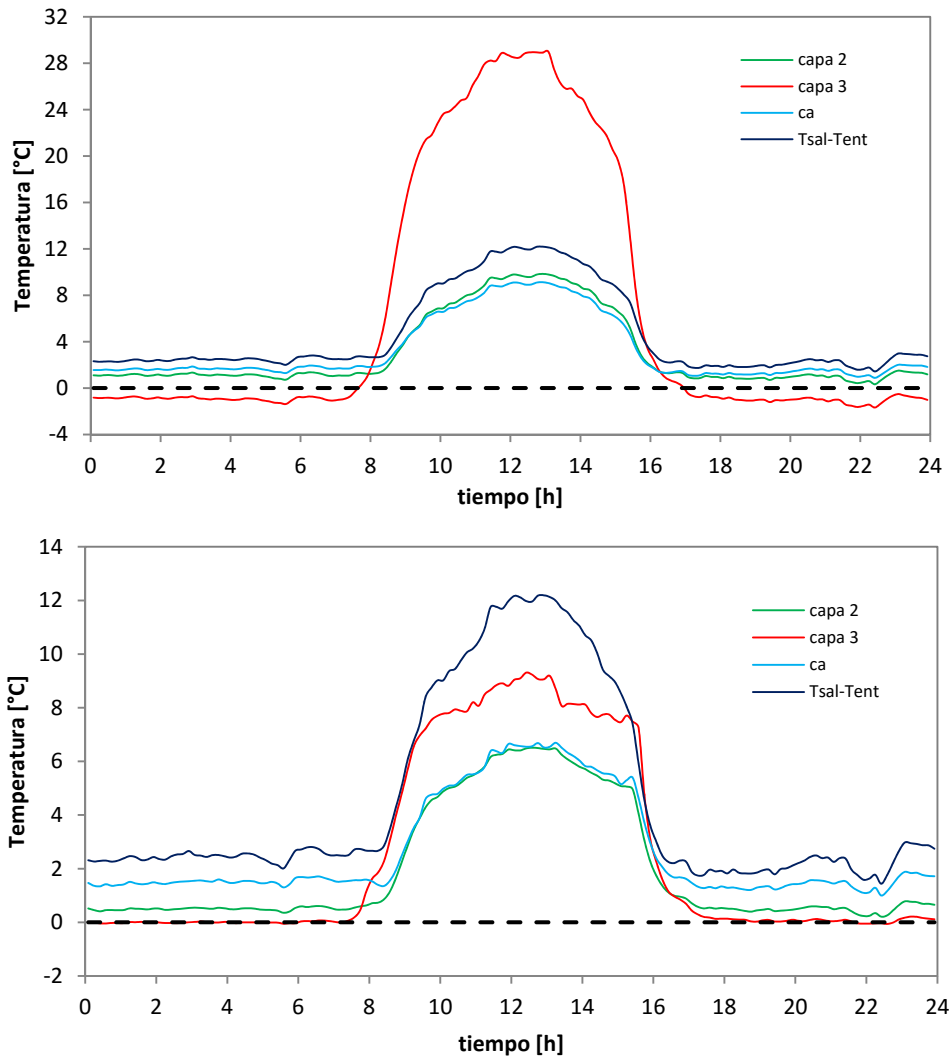


Figura 4.129 – Salto de temperaturas respecto al exterior, superior, y gradiente de temperatura, inferior, en las diferentes capas y aire de la cámara ventilada

En la gráfica superior de la Figura 4.129 se muestra el salto de temperaturas respecto al aire exterior de cada una de las capas de la cámara ventilada. Se puede apreciar que estos gradientes son importantes, de forma que el empleo de valores medios de temperatura de cada superficie puede representar una aproximación con un margen de error elevado en la fase de modelado de la fachada forzada. Este tema se analiza con más detalle en el *Capítulo 5*. En la Figura 4.130 se muestra la relación entre el salto de temperaturas del aire respecto a la radiación solar incidente sobre la probeta y respecto al caudal de aire circulante por la cámara ventilada. Se puede ver claramente

que la radiación solar es el motor del calentamiento del aire, y que dicho calentamiento se produce de forma simultánea a la campana de radiación y que se desfasa un poco en el tiempo debido al calor residual acumulado en la probeta, pero siendo muy pequeño este desfase, debido a la poca inercia de los materiales. En cuanto al caudal circulante, se ve cómo el aumento respecto al valor base impulsado por la soplante se solapa directamente con el efecto de flotación por convección natural.

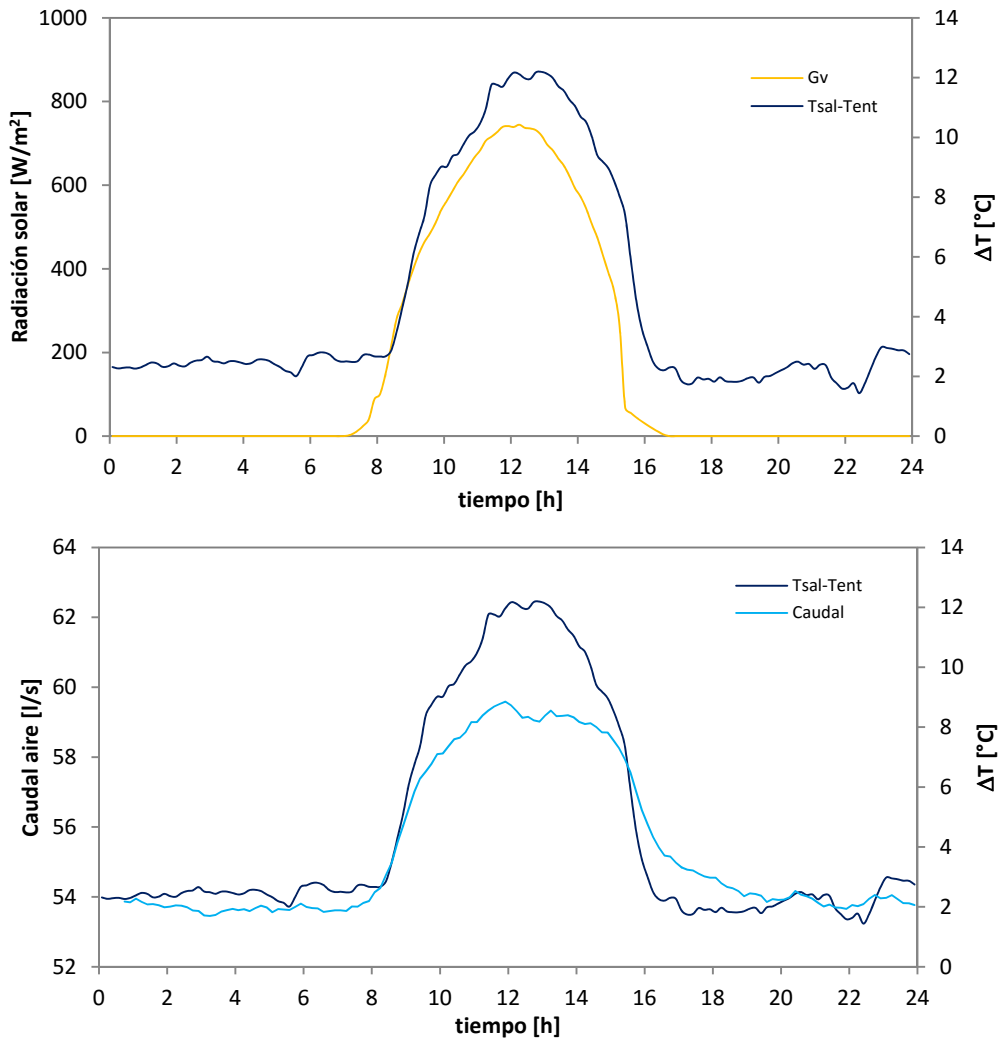


Figura 4.130 – Evolución del salto de temperatura del aire dentro de la cámara ventilada frente a la radiación solar y caudal del aire en la fachada forzada

En la Figura 4.131 se muestran los perfiles transversales de temperatura en el punto central y el perfil en altura de la temperatura del aire en el eje central del espesor de la cámara. Si se analiza la evolución respecto a tiempo del perfil de temperaturas transversal en la cámara de aire, ver Figura 4.132, se puede ver, junto con los instantes puntuales mostrados en la figura anterior, que las máximas temperaturas alcanzadas por la hoja exterior sólo afectan a una lámina de aire de espesor menor a 0,5 [cm] dentro de la cámara ventilada. Esta forma de perfil tiene un efecto importante sobre la relación entre las temperaturas medidas experimentalmente respecto al valor eficiente de temperatura de la sección de la cámara ventilada. Por correlación entre las capas límite térmica y la capa límite hidrodinámica, también se produce un efecto equivalente entre la relación de la velocidad eficiente respecto a la velocidad medida en el punto central.

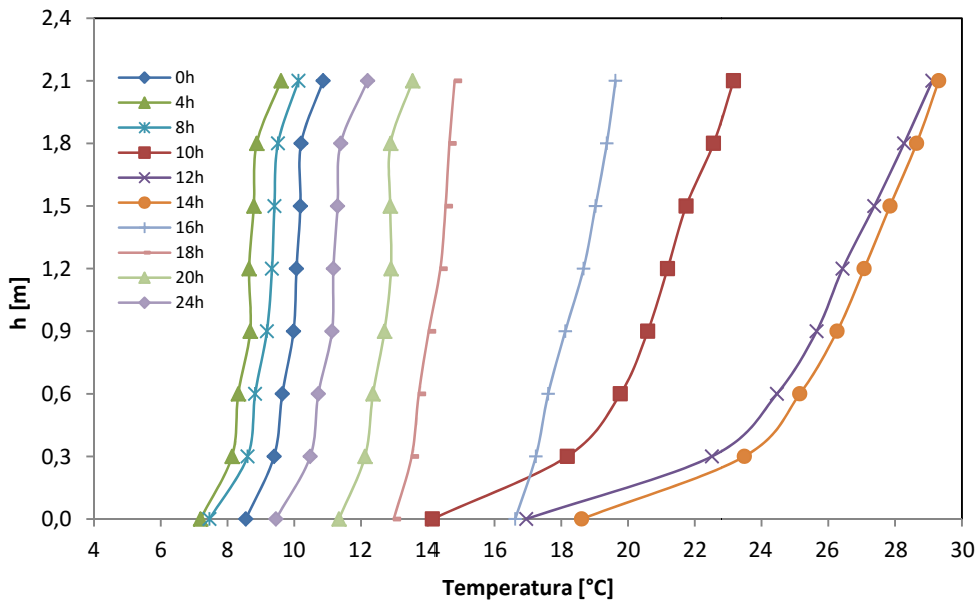
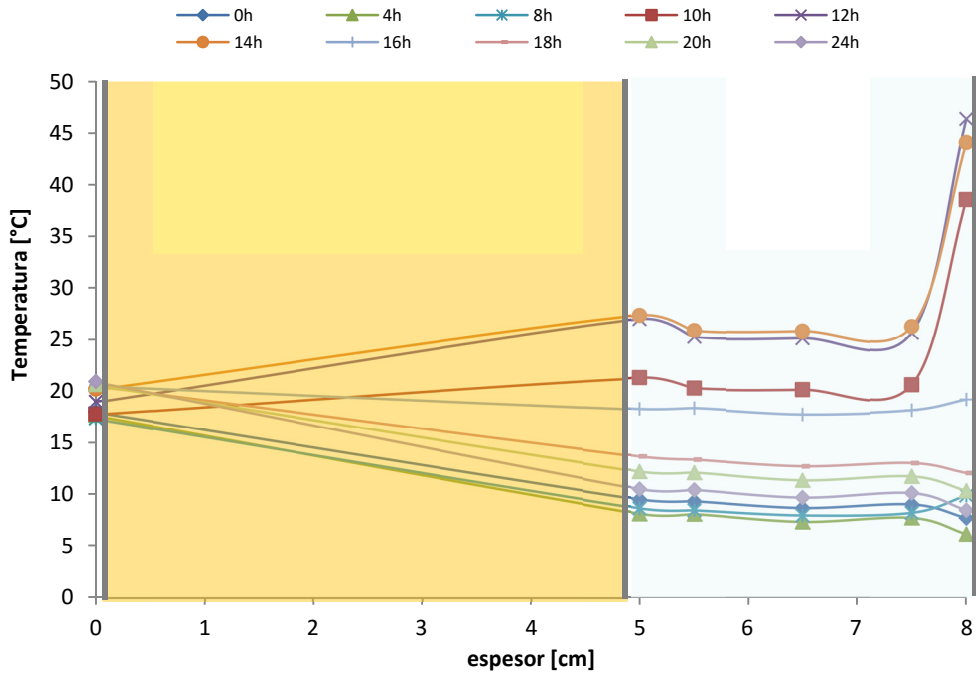


Figura 4.131 – Perfiles de temperatura en la muestra de fachada ventilada forzada día 19 de noviembre

Este efecto se puede ver más claramente en la Figura 4.133, donde se compara el caudal circulante con la medida de velocidad en el punto central de la cámara ventilada. El aumento de caudal no se ve representado en un aumento de la velocidad circulante en el punto central de la cámara, ya que este aumento se convierte en una aceleración superficial en la cercanía de la chapa exterior de la fachada. Por tanto, el análisis térmico del comportamiento de los sistemas de fachada ventilada exige un estudio matemático más amplio de los datos experimentales, un estudio como el que se desarrolla en el apartado 5.2.2, del Capítulo 5, para el caso de la fachada natural ligera. Por último, en la Figura 4.134 se muestra el comportamiento de la cámara ventilada en relación a las pérdidas de carga en el movimiento del aire respecto al caudal circulante. Se puede observar que la pérdida de presión en la zona de entrada se mantiene constante, pero sin embargo las pérdidas en la circulación a lo largo de la

altura de la probeta, y en la zona de salida se ven afectadas por la componente de convección natural y su repercusión en el aumento del caudal. Una vez evaluados los datos experimentales del conjunto de ensayos realizados, en el siguiente capítulo se realiza un estudio detallado de la probeta de fachada ventilada natural ligera. Esta solución constructiva es la que presenta mayor aplicación en el sector de la edificación, tanto para nueva construcción como para sistemas de rehabilitación.

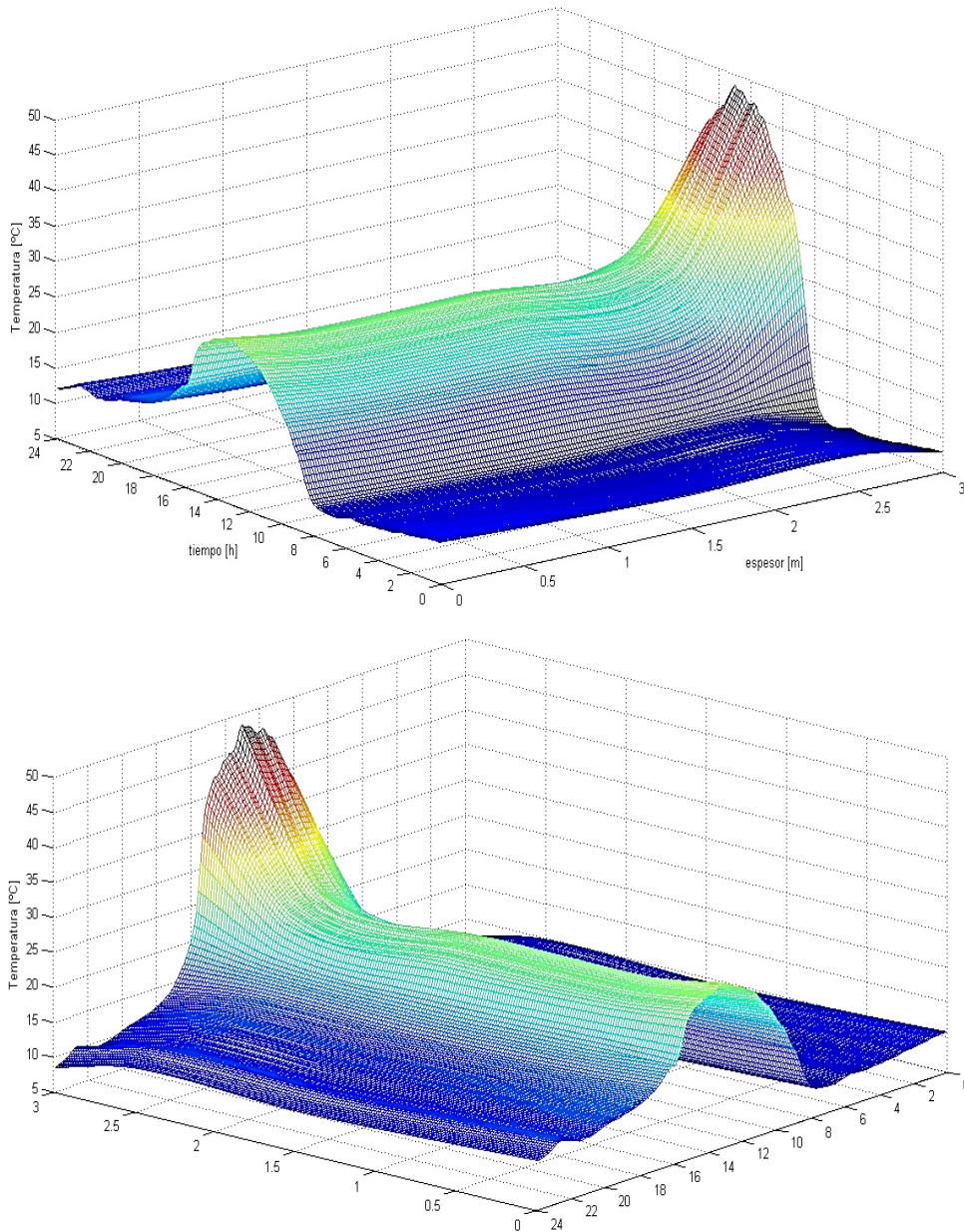


Figura 4.132 – Evolución del perfil de temperaturas en el punto central de la cámara ventilada a lo largo del día 19 de noviembre para la fachada forzada

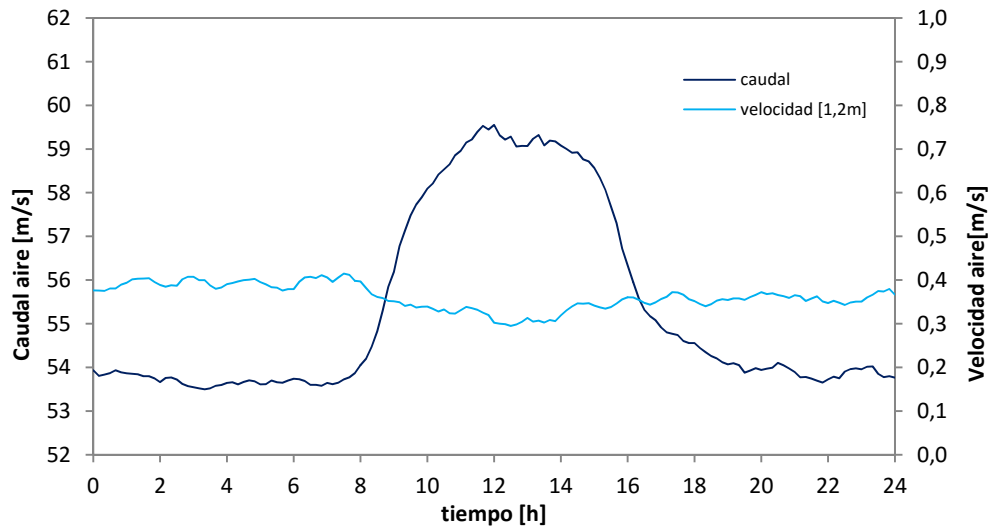


Figura 4.133 – Caudal y velocidad del aire dentro de la cámara ventilada a lo largo del día 19 de noviembre en la fachada forzada

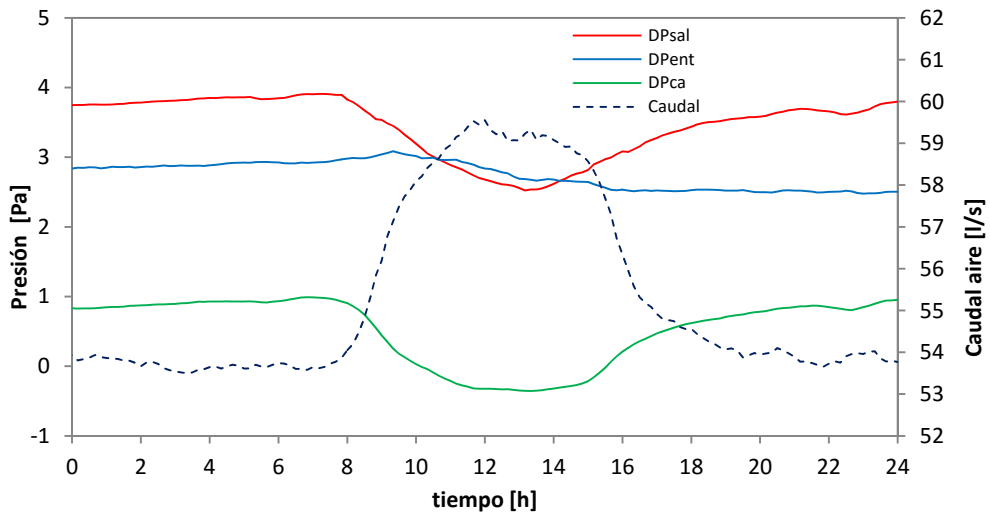


Figura 4.134 – Evolución de las presiones dentro de la cámara ventilada y caudal de aire a lo largo del día 19 de noviembre en la fachada forzada

Capítulo 5

Modelos matemáticos





5.1 Modelo del muro base

Como primera fase, en el *apartado 5.1*, se estudia el muro base aplicando la metodología *PASLINK*, para lo cual se emplea un modelo de parámetros concentrados. Este paso es fundamental, ya que la caracterización adecuada del muro base permitirá posteriormente determinar los flujos que las superficies interiores intercambian con la cámara de aire en las fachadas ventiladas. Este primer paso también permite evaluar la capacidad de la celda de ensayos y las herramientas de identificación de parámetros, para caracterizar soluciones constructivas heterogéneas, ya que en los ensayos de calibración y de trazabilidad se emplean muros homogéneos. Una vez que se conoce con precisión el comportamiento de los muros base se pasa a estudiar el comportamiento de la fachada ventilada, *apartado 5.2*. El estudio se centra en la solución de fachada ventilada natural ligera y se inicia con el modelado de la muestra de ensayo mediante una herramienta de volúmenes finitos. Este estudio es necesario para complementar los datos experimentales del ensayo, *apartado 5.2.2*. Y se finaliza con un modelo de convección natural de la cámara ventilada y un modelo de parámetros concentrados de la solución completa, *apartado 5.2.3*. Estos modelos se implementarán posteriormente, en el *Capítulo 6*, en un modelo final a escala de edificio que permitirá analizar la repercusión de los sistemas de fachada ventilada en la demanda energética de las viviendas.

5.1.1 Modelo del muro base sin aislamiento

Para determinar el modelo del muro base se aplica la metodología seguida en el ensayo de calibración y en el ensayo de trazabilidad *IQ-Test*. Hay que tener en cuenta la complejidad de la muestra, ya que en este caso está formada por varias capas con propiedades térmicas muy diferentes. Primero se calcula las propiedades de la probeta a través de las sondas situadas en el centro de la muestra, de forma que se puede considerar válida la hipótesis de flujo unidimensional. A continuación, se determina el valor total de la probeta junto con los efectos de borde del sistema de portamuestras. En la Figura 5.1 se muestra el modelo empleado para el flujo central de la muestra.

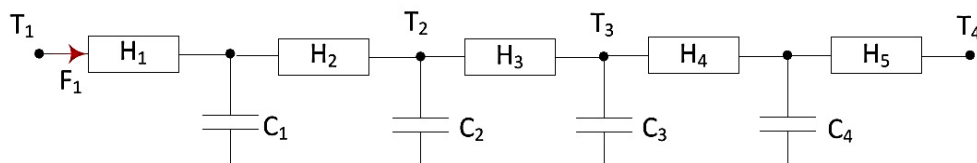


Figura 5.1 – Modelo flujo unidimensional del muro base sin aislamiento

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0,175	2,9	C _{tab}	0,049	1,8
R _{ca}	0,187	1,7	C _{perf}	0,157	13,9
R _{perf}	0,152	18,0	C_{total}	0,207	11,0
R_{total}	0,514	6,9			

Tabla 5.1 –Propiedades de cada capa del modelo unidimensional de muro base

Se busca obtener el modelo más sencillo que permita conocer las propiedades térmicas individuales de cada capa, ya que en los posteriores estudios de las fachadas activas es necesario conocer los flujos en cada superficie para poder analizar el comportamiento de la cámara ventilada. Entre los nodos con temperaturas T_1 y T_2 se representa el tabique interior (*tab*), entre T_2 y T_3 la cámara de aire estanca (*ca*), y entre T_3 y T_4 el tabique exterior (*perf*). En la Tabla 5.1 se recogen los resultados obtenidos para las propiedades térmicas de cada una de las capas que conforman el muro base, y los valores totales del mismo. También se indican las incertidumbres finales de los resultados, teniendo en cuenta la componente de error del proceso de identificación de parámetro junto con los errores del proceso de ensayo, más la componente obtenida mediante la propagación de incertidumbres de los errores de medida de la instrumentación. Las ecuaciones del modelo, los resultados parciales, y el análisis de validación mediante el estudio de residuos, se recoge con detalle en el Anexo D.

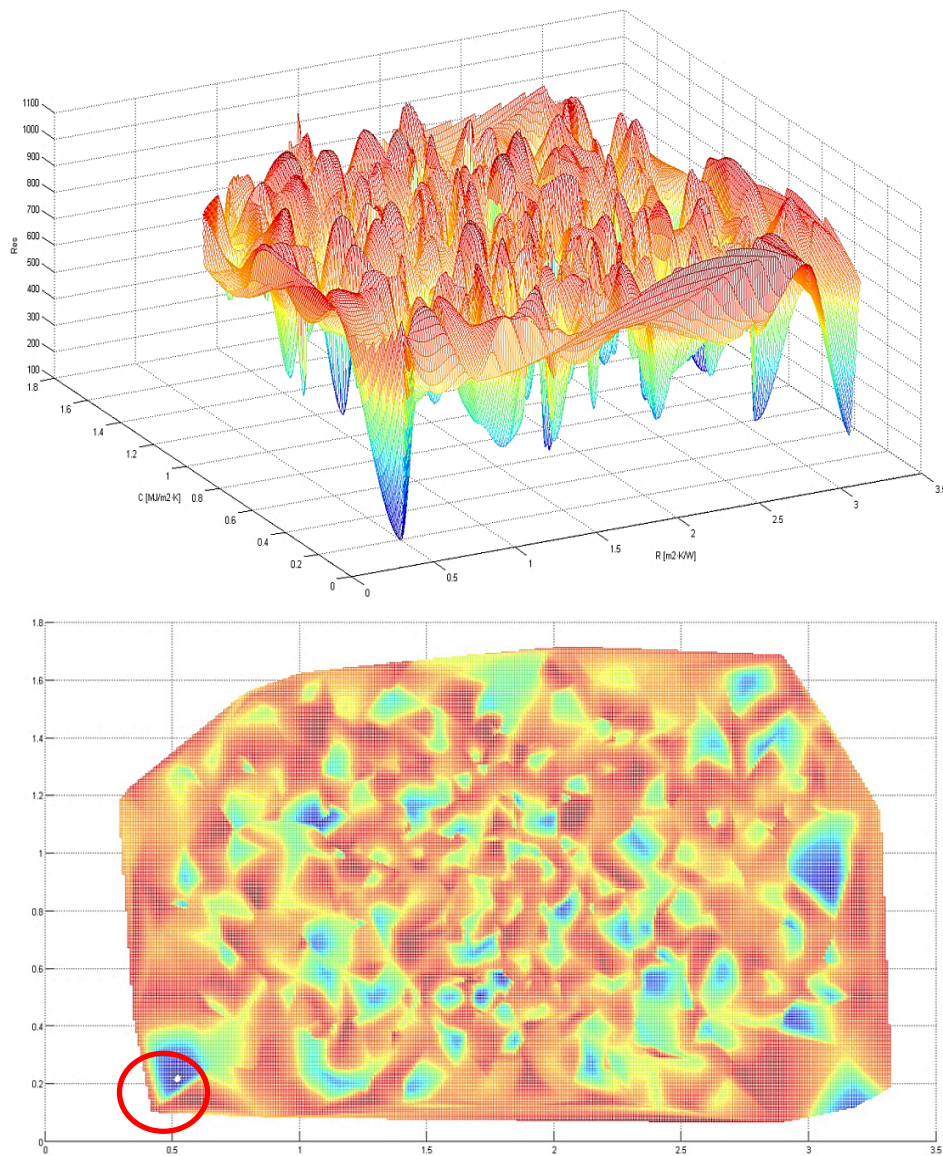


Figura 5.2 – Superficie de residuos en el proceso de identificación de parámetros del muro base

En resumen, se puede concluir que los valores de propiedades térmicas obtenidos son próximos a los valores normalizados^[32], pero con ciertas diferencias. Se obtienen capacidades térmicas más altas y resistencias más pequeñas, esto es debido al efecto de las juntas de mortero de agarre, que penetra en las cavidades de aire de los bloques. La medida de dichas propiedades con precisión, gracias al ensayo, permite obtener una mayor calidad en la determinación de los flujos de calor que se intercambian. Antes de dar el siguiente paso en el modelado del muro base, es necesario analizar con más detalle el proceso de identificación de parámetros. Hasta el momento las muestras estudiadas mediante la metodología *PASLINK* eran relativamente sencillas, ya que estaban constituidas por un material características homogéneas. En este caso, la muestra dispone de diferentes capas de características dispares, lo que complica el proceso de identificación. Para dar una idea de lo expuesto, en la Figura 5.2 se muestra la superficie de residuos para los valores totales de resistencia y capacidad térmica de la muestra, en un rango amplio de dichas variables. Las diferencias son claras si se compara con la superficie de residuos obtenida para el muro opaco del ensayo de *IQ-Test*, ver apartado 3.4.1, del Capítulo 3.

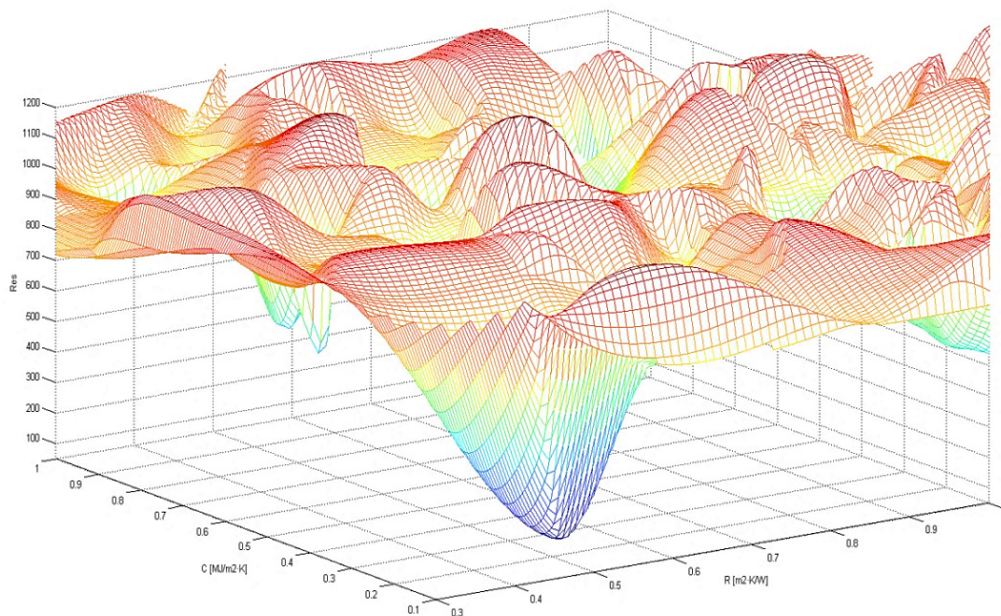


Figura 5.3 – Superficie de residuos acotada, proceso de identificación de parámetros del muro base

La resistencia térmica va desde $R_{total} \in [0-3,5]$ [m^2K/W] y la capacidad térmica $C_{total} \in [0-2]$ [MJ/m^2K]. Se puede ver cómo en la superficie de residuos hay un gran número de valles, pero sólo uno presenta un mínimo absoluto, remarcado por un círculo rojo en la figura, situado en el entorno de $R_{total} \approx 0,5$ [m^2K/W] y $C_{total} \approx 0,2$ [MJ/m^2K]. La imagen de residuos demuestra la gran importancia de disponer de un método de identificación de parámetros muy robusto, que permita detectar el punto real con fiabilidad. En este aspecto, el trabajar con las dos herramientas de identificación definidas en el Capítulo 3 es un gran apoyo. El *LORD* presentan una gran fiabilidad en la detección de mínimos absolutos gracias a la robustez de los dos métodos que emplea, *Downhill Simplex* y *Monte Carlo*, y una vez acotado dicho mínimo, el *CTSM* presenta una gran precisión en la determinación de los parámetros gracias a la potencialidad del análisis estadístico. Si se reduce la superficie de búsqueda acotando el rango de las propiedades térmicas a unos valores más razonables para las características de la muestra, como se puede ver en la Figura 5.3, el mínimo absoluto pasa a ser único. Esta calidad de resultados se debe a las elevadas prestaciones de

ensayo que aporta la metodología *PASLINK*, sumadas a las características de la celda *EGUZKI*. El empleo de la rutina de ensayo que maximiza la información recogida en los datos medidos y una celda de ensayo que reduce al mínimo su influencia sobre la muestra, permiten obtener precisiones de ensayo en condiciones exteriores del mismo orden que los métodos en condiciones de laboratorio, como es el caso de la caja caliente guardada.

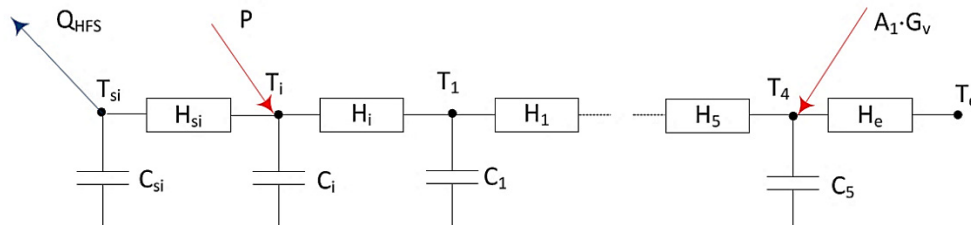


Figura 5.4 – Modelo flujo completo del muro base sin aislamiento

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0,168	4,3	C _{tab}	0,045	6,3
R _{ca}	0,185	2,8	C _{perf}	0,162	3,9
R _{perf}	0,144	1,0	C_{total}	0,208	4,4
R_{total}	0,496	2,8			

Tabla 5.2 –Propiedades del modelo de celda completo para el muro base

Una vez realizado el estudio unidimensional, el siguiente paso es ampliar el modelo a la celda completa. Dicho modelo se muestra en la Figura 5.4 y consiste en el modelo de muro base definido en la Figura 5.1 más la interacción con la sala de ensayos y la interacción con las condiciones exteriores, temperatura ventilada y radiación solar sobre la superficie vertical. En la Tabla 5.2 se recogen los valores obtenidos para las propiedades térmicas de cada capa del muro base en el modelo de celda completa, junto con las incertidumbres finales obtenidas tras aplicar la propagación de errores de las variables de ensayo. Las diferencias respecto al modelo de flujo unidimensional son de $R_{total} = 3,4\%$ y de $C_{total} = 0,4\%$. En cuanto a la resistencia térmica, el valor inferior obtenido en el modelo de celda completa se debe a los efectos de borde de la muestra. Si se estima su efecto mediante el factor lineal de borde se obtiene un valor de $\psi_{mb} = 0,012$ [W/mK]. El valor final de resistencia térmica se podría ajustar más si se emplea un modelo con dos ramas para representar el muro base. Pero teniendo en cuenta que las diferencias entre ambos resultados son inferiores a la incertidumbre de cálculo se considera válido. En cuanto a la capacidad térmica, el valor es equivalente.

Una vez comparados los valores de las propiedades térmicas, el siguiente aspecto en importancia son las incertidumbres de dichos valores. Aquí es donde destaca el potencial del ensayo *PASLINK*. Las incertidumbres de medida se reducen a la mitad respecto al estudio unidimensional. Esto se debe a las prestaciones globales de la metodología de ensayo. Por un lado, la celda no solo no enmascara a la muestra sino que potencia su comportamiento durante el periodo de ensayo, aportando una precisión elevada en la medida de los flujos de calor intercambiados durante el ensayo. Y por otro lado, la rutina de excitación de la sala de ensayos junto con el potencial de las herramientas de identificación de parámetros permite resaltar la función objetivo. Es decir, si nos fijamos en la superficie de residuos de la Figura 5.2, el modelo ampliado

a la celda completa genera un mínimo en el punto correspondientes a las propiedades térmicas de la muestra más diferenciado del resto de mínimos del rango de identificación. Este es uno de los principales aspectos de desarrollo del presente trabajo y que permite disponer de una base de medida de gran precisión para la posterior caracterización del comportamiento térmico de los sistemas de fachadas ventiladas. Para terminar de definir el modelo, quedan por analizar las propiedades exteriores. De la identificación se obtiene una apertura solar para la superficie de mortero de revestimiento de $A_1 = 0,803 \pm 0,094$ y un coeficiente superficial de convección de $h_e = 23,7 \pm 2,8$ [W/m²K]. Los valores obtenidos son coherentes con los esperados para las características de la muestra y las condiciones de ensayo de la celda. Un punto importante es que estas dos propiedades presentan una elevada correlación en el estudio usual de identificación de parámetros; sin embargo, en el modelo obtenido dicho coeficiente de correlación es de $\zeta_{COR} = 0,026$, muy alejado de la unidad. Esto demuestra la eficiencia de desacople de las condiciones de la sala de ensayo respecto a las condiciones del ambiente exterior.

5.1.2 Modelo del muro base con aislamiento

Una vez caracterizado el muro base, se repite el proceso de estudio para el muro con aislamiento. Primero se determinan las propiedades mediante las medidas unidimensionales, y para ello se amplía el modelo de la Figura 5.1. Se aumenta el orden y se añaden dos conductancias, entre los nodos con temperaturas T_4 y T_6 , que representa la capa de aislamiento por el exterior, ver Figura 5.5. Además, se suma a la función objetivo la temperatura de la capa intermedia entre muro y aislamiento, T_4 . En el Anexo D se muestran los resultados completos del modelo y el análisis de residuos. En la Tabla 5.3 se recogen los valores obtenidos por el modelo unidimensional para cada capa de la probeta, junto con las incertidumbres totales de ensayo. Los valores de las capas del muro concuerdan perfectamente con los resultados del ensayo previo del muro base sin aislamiento.

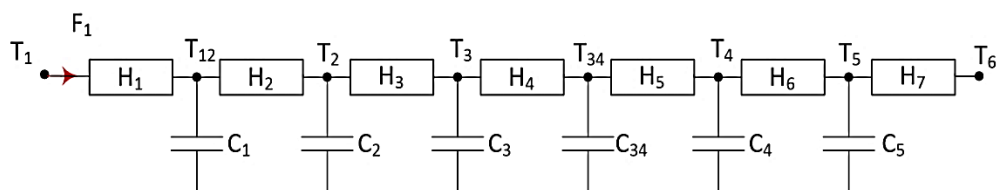


Figura 5.5 – Modelo flujo unidimensional del muro base con aislamiento

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R_{tab}	0,176	3,2	C_{tab}	0,049	12,1
R_{ca}	0,184	5,1	C_{perf}	0,156	8,2
R_{perf}	0,155	3,3	C_{SATE}	0,009	30,5
R_{SATE}	1,350	5,2	C_{total}	0,214	9,6
R_{total}	1,864	4,8			

Tabla 5.3 – Propiedades del modelo unidimensional para el muro base con aislamiento

La conductividad media de la capa de aislamiento obtenida es de $\lambda_{SATE} = 0,041$ [W/mK], muy próxima al valor de conductividad de la lana mineral obtenida en el ensayo de

norma, $\lambda_{LM} = 0,039$ [W/mK]. La diferencia es asumible, teniendo en cuenta que en el sistema SATE el espesor de mortero de revestimiento, $e_{reves} = 0,5$ [cm], no aporta prácticamente resistencia térmica al conjunto de la capa de aislamiento. También hay que tener en cuenta que la conductividad del aislante crece con la temperatura. Un aspecto interesante es que las incertidumbres de ensayo son más reducidas que en el muro base sin aislamiento. Esto se debe a las características de la muestra. En el caso del muro base, todas las capas presentaban unas propiedades térmicas muy similares. Sin embargo, en el segundo ensayo, la capa de aislamiento presenta una resistencia muy superior al resto de capas, y una inercia muy reducida. Esta disparidad de propiedades ayuda a la unicidad de resultados del proceso de identificación. Una vez determinadas las propiedades de referencia de la muestra se pasa a estudiar el modelo de celda completa para estimar los efectos de borde. En la Figura 5.6 se muestra el esquema del modelo empleado. Los resultados del proceso de identificación se recogen en la Tabla 5.4. Como en el caso anterior, en el Anexo D se muestran los resultados completos del modelo y el análisis de residuos.

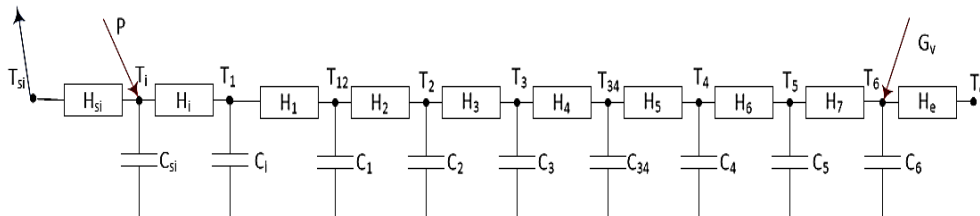


Figura 5.6 – Modelo de celda para el muro base con aislamiento exterior

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0.177	8.9	C _{tab}	0.049	10.7
R _{ca}	0.183	5.5	C _{perf}	0.160	6.2
R _{perf}	0.159	11.1	C _{SATE}	0.009	15.9
R _{SATE}	1.271	2.0	C_{total}	0.218	7.6
R_{total}	1.790	3.8			

Tabla 5.4 – Propiedades térmicas por capa del modelo de celda para el muro base con aislamiento

Se puede ver que el modelo de celda reduce el error de los resultados, como sucedía en los casos anteriores. En cuanto a los efectos de borde del sistema de portaprobetas, la diferencia con los valores del modelo unidimensional, son de un 4% inferior en la resistencia térmica y 2% superior en la capacidad térmica. Como es de esperar, la zona de borde aumenta el flujo intercambiado por la probeta, por lo que se obtienen valores inferiores de resistencia térmica y la estructura del portamuestras aporta algo de inercia térmica al modelo. Pero las diferencias son reducidas, y dentro del rango de incertidumbre del ensayo, por lo que se puede dar por válido el modelo. Para finalizar el proceso de definición del modelo de muro base con aislamiento, queda por determinar la apertura solar y el coeficiente de convección exterior. Para ello se define un modelo equivalente al de la Figura 5.4. El valor que se obtienen para la apertura solar de la superficie exterior de mortero del SATE es de $A_1 = 0,817 \pm 0,080$ y el coeficiente de intercambio de calor con el ambiente exterior es $h_e = 27,0 \pm 3,0$ [W/m²K]. Los valores son muy parecidos a los que se obtenían en el caso del muro base sin aislamiento, como era de esperar, ya que el mortero final de revestimiento es el mismo para ambas probetas. Y las incertidumbres finales de ambos parámetros también son similares, en

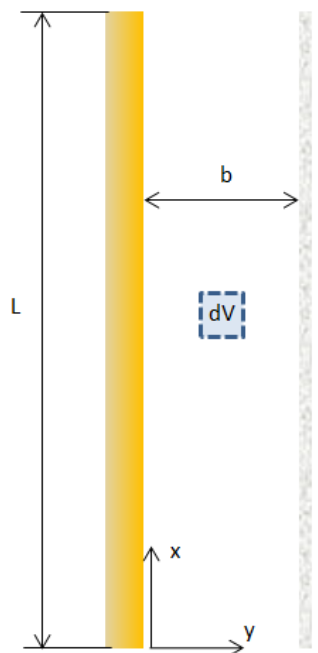
este caso son del 9,8% y 11,2% respectivamente. En el Anexo D se muestra el proceso de cálculo de estos parámetros.

5.2 Modelo de la fachada ventilada de tiro natural

Una vez caracterizado adecuadamente el muro base ya se dispone de la herramienta necesaria para conocer los flujos de calor que se intercambian en la fachada ventilada. En este apartado se desarrollan y contrastan los modelos de convección natural que representan el comportamiento térmico del sistema de fachada ventilada evaluada experimentalmente. Como primer paso se realiza un repaso bibliográfico de las correlaciones más aplicadas en el ámbito de la convección natural entre placas planas. Posteriormente se desarrolla un modelo de CFD de la fachada ventilada que se ajusta con los datos experimentales y que se emplea para obtener los coeficientes de corrección de las medidas puntuales a los valores equivalentes de sección para los perfiles de temperatura y velocidad. Una vez obtenidos dichos coeficientes se puede realizar un análisis de la validez de las correlaciones de convección disonibles para predecir el comportamiento real de la fachada.

5.2.1 Modelos convencionales

Para representar el comportamiento de aire dentro de la cámara ventilada de las fachadas se considera que el movimiento es bidimensional, en altura, eje x, y anchura de la cámara, eje y, despreciando las componentes perpendiculares, eje z, ver Figura 5.7.



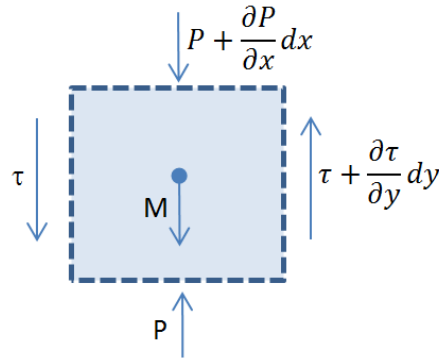
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} - g \quad [5.1]$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

Figura 5.7 – Ecuaciones de convección natural en la cámara ventilada

De esta forma, el sistema de ecuaciones completas, en coordenadas cartesianas, para el caso de convección natural es el indicado en [5.1]. La primera ecuación corresponde a la conservación de la masa, la segunda a la conservación de la cantidad de movimiento, y la tercera a la conservación de la energía. La ecuación de conservación del movimiento es la que tiene mayor relevancia, ya que es la que define el régimen de flujo que se produce en el proceso de convección.



[5.2]

$$F_x = \left(\frac{\partial \tau}{\partial y} dy \right) dx - \left(\frac{\partial P}{\partial x} dx \right) dy - (\rho g) dx dy$$

$$F_y = \left(\frac{\partial \tau}{\partial x} dx \right) dy - \left(\frac{\partial P}{\partial y} dy \right) dx = 0$$

Figura 5.8 – Balance de fuerzas sobre el dm del aire en la cámara ventilada

Para obtener la forma definida anteriormente se considera que la componente principal del movimiento del aire es ascendente y que las velocidades en la dirección perpendicular a las superficies de la fachada, eje y , son muy pequeñas, $v \ll u$, y por tanto se pueden despreciar los esfuerzos en dicha dirección. De esta forma, el balance de fuerzas que actúa sobre el elemento diferencial de masa de aire, dm , dentro de la cámara ventilada, es el que se muestra en [5.2], de la Figura 5.8. En el eje x , también se consideran despreciables los esfuerzos normales a la superficie superior e inferior del dm , de forma que sólo participan en el balance la variación de presión, el peso, y los esfuerzos cortantes. El término de variación de presión y peso de la ecuación se puede expresar como una variación de densidades, tomando como referencia las condiciones ambientales fuera de la cámara ventilada, P_∞, T_∞ y considerando que la variación de presión en altura se aproxima a la variación de presiones hidrostáticas, [5.3].

$$P(x) = P_\infty(x) \rightarrow \frac{\partial P}{\partial x} = -\rho_\infty g$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (\rho_\infty - \rho)g$$

[5.3]

Considerando el fluido como incomprensible y newtoniano, se puede aplicar las ecuaciones de gas perfecto para expresar la diferencia de densidades como diferencia de temperaturas mediante el coeficiente de expansión volumétrica, aproximando las diferenciales mediante diferencias finitas, [5.4].

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta T} = -\frac{1}{\rho} \frac{(\rho_\infty - \rho)}{(T_\infty - T)} \quad [5.4]$$

Este planteamiento del término de esfuerzos permite obtener una formulación de la ecuación de cantidad de movimiento, denominada aproximación de *Boussinesq*, muy útil para su posterior resolución, ver [5.5], dando resultados precisos para el rango de trabajo de temperaturas del presente estudio.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g\beta(T - T_\infty) \quad [5.5]$$

Si se define la ecuación de forma adimensional, realizando el cambio de variables que se indica en [5.6], donde se puede tomar como longitud característica el espesor de la cámara de aire, b , o la altura de la misma, L . La ecuación de cantidad de movimiento queda de la forma [5.7], donde todos los efectos de la convección natural se engloban en el término de *Grashof*, [5.8], que relaciona los esfuerzos de flotación con las fuerzas viscosas.

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x}{L_c} & y' &= \frac{y}{L_c} \\ u' &= \frac{u}{V} & v' &= \frac{v}{V} \\ T' &= \frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty} & V &= Re_{L_c} \frac{\nu}{L_c} \end{aligned} \quad [5.6]$$

$$u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial v'}{\partial y'} = \frac{1}{Re_{L_c}} \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} + \left[\frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \right] \frac{T'}{Re_{L_c}^2} \quad [5.7]$$

$$\begin{aligned} Gr_{L_c} &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \\ Re_{L_c} &= \frac{v \cdot L_c}{\nu} \end{aligned} \quad [5.8]$$

El número de Gr permite determinar el tipo de flujo que se produce dentro de la cámara ventilada, siendo el valor crítico de transición entre flujo laminar y turbulento del orden de $Gr \approx 10^9$, y a su vez, permite determinar si el movimiento se produce puramente por convección natural o existen componentes de convección forzada, [5.9]. Para simplificar el estudio de transmisión de calor, es interesante poder aplicar la ley de enfriamiento de *Newton*, de forma que el calor absorbido por el aire en la cámara ventilada se pueda expresar en función de las temperaturas de las superficies y del aire exterior, ecuación [5.10].

$$\begin{aligned}\frac{Gr_{L_c}}{Re_{L_c}^2} &\gg 1 \rightarrow \text{convección natural pura} \\ \frac{Gr_{L_c}}{Re_{L_c}^2} &\approx 1 \rightarrow \text{convección mixta} \\ \frac{Gr_{L_c}}{Re_{L_c}^2} &\ll 1 \rightarrow \text{convección forzada pura}\end{aligned}\quad [5.9]$$

Como dicho flujo de calor se produce en la zona de contacto con las superficies, en esa zona el aire no tiene velocidad, y por tanto la transmisión de calor se produce por conducción, [5.11], de forma que si se aplica esta condición de contorno al problema se obtiene la expresión [5.12] para el coeficiente de convección.

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad [5.10]$$

$$q = -\lambda_a \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \quad [5.11]$$

$$h = -\frac{\lambda_a \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0}}{(T_s - T_\infty)} \quad [5.12]$$

Si esta relación se expresa de forma adimensional se obtiene la expresión [5.13] donde aparece el número adimensional de *Nusselt*, [5.14], que representa el gradiente adimensional de temperaturas dentro del fluido.

$$\left(\frac{\partial T'}{\partial x'} \right)_{x'=0} = -\frac{hL_c}{\lambda_a} \quad [5.13]$$

$$Nu = \frac{hL_c}{\lambda_a} \quad [5.14]$$

El número de *Nusselt* juega un papel fundamental, ya que permite desarrollar la función que relaciona el coeficiente de convección en relación a los parámetros que caracterizan el proceso de transmisión de calor, [5.15]. Si se busca expresar el coeficiente de convección como un producto de las variables asociadas, elevadas a un exponente, ecuación [5.16], dichos exponentes deben cumplir la coherencia adimensional.

$$h = f(\lambda_a, \rho, \mu, c_p, V, L_c) \quad [5.15]$$

$$h = cte \cdot \lambda_a^x \cdot \rho^y \cdot \mu^z \cdot c_p^n \cdot V^m \cdot L_c^r \quad [5.16]$$

Como el problema está sobredimensionado, se dejan los exponentes n y m como parámetros, de forma que se obtiene la expresión [5.17]. Teniendo en cuenta la aproximación planteada para la variación de densidad con la temperatura en el proceso de convección natural, se obtiene finalmente la relación [5.18].

$$h = cte \cdot \frac{\lambda_a}{L_c} \cdot \left[\frac{\mu c_p}{\lambda_a} \right]^n \left[\frac{\rho V L_c}{\mu} \right]^m \quad [5.17]$$

$$Nu = cte [Pr]^n [Gr]^m \quad [5.18]$$

Este resultado concuerda con los criterios del análisis dimensional, ya que se disponen de siete magnitudes físicas de las cuales cuatro son dimensionalmente independientes, por lo tanto, la ecuación puede expresarse como relación entre tres números adimensionales que engloban dichas magnitudes. Si no se le asocia una forma determinada a la ecuación que relaciona el coeficiente de convección, se puede plantear que el problema de convección natural queda definido de la forma [5.19], y para simplificar, si se emplea el número de *Raileigh* que se obtiene del producto de Gr y Pr , ecuación [5.20], el modelo de convección natural queda de la forma [5.21].

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad [5.19]$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad [5.20]$$

$$Nu = f(Ra) \quad [5.21]$$

Existe amplia documentación sobre estudios experimentales de convección natural en placas planas paralelas, en condiciones de laboratorio^[150]. El modelo más empleado para el caso de placas planas y régimen laminar es el planteado por *Bar-Cohen* y *Rohsenow*^[193,194]. Este modelo está revisado y ajustado, más recientemente, por *Olsson*^[84,85], y se define mediante las ecuaciones indicadas en [5.22], donde se emplea el número de Ra modificado $Ra' = Ra \cdot b/H$. En este modelo el valor del Nu medio en la cámara de aire se obtiene de la composición de la zona en desarrollo del fluido, Nu_p , y de la zona con flujo completamente desarrollado, Nu_{fd} .

$$Nu_b = \left[(Nu_{fd})^{-1.3} + (Nu_p)^{-1.3} \right]^{-1/1.3}$$

$$Nu_{fd} = \frac{Ra'_b}{24}$$

$$Nu_p = cC_l (Ra'_b)^{1/4} \cdot f \quad [5.22]$$

$$C_l = \frac{0.671}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$f = 1 + (Ra'_b)^{-0.4}$$

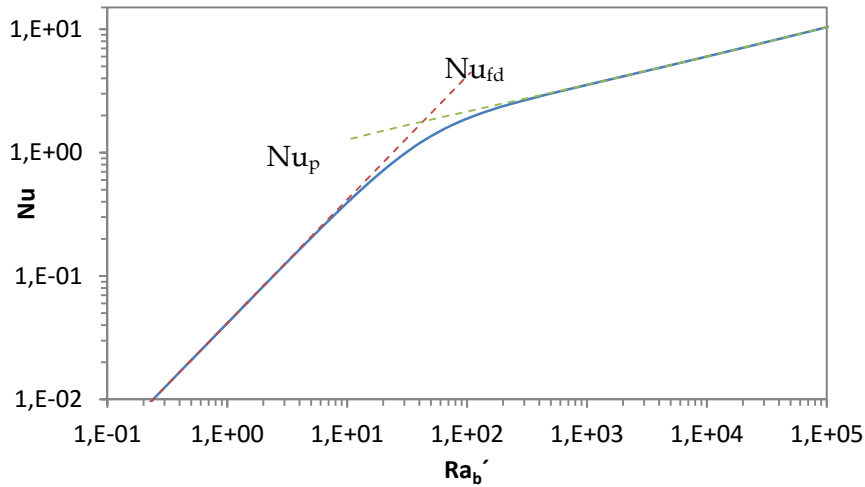


Figura 5.9 – Valores de Nu para el caso de placas isotermas

En la zona de entrada, las superficies que conforman la cámara de aire se comportan a convección como si fueran placas libres, ya que el espesor de las capas límites de temperatura y velocidad no se ven afectadas por la presencia de la otra superficie. La zona de flujo en desarrollo presentará mayor influencia en el valor final de Nu , cuanto mayor sea el espesor, b , de la cámara de aire. En la zona de flujo completamente desarrollado el cálculo de valor de Nu se simplifica en gran medida. La curva de Nu que se obtiene para un rango de $Ra_b' < 1 \cdot 10^5$ se muestra en la Figura 5.9. La correlación [5.22] se obtiene del estudio de placas isotermas y simétricas, y el coeficiente c del término correspondiente al Nu_p toma los valores de $c = 1,32$ ó $c = 1,20$; ambos valores presentan un buen ajuste con diferentes datos experimentales disponibles. Y toma el valor de $c = 1,00$ para el caso de placas aisladas térmicamente. El efecto de este coeficiente se muestra en la Figura 5.10.

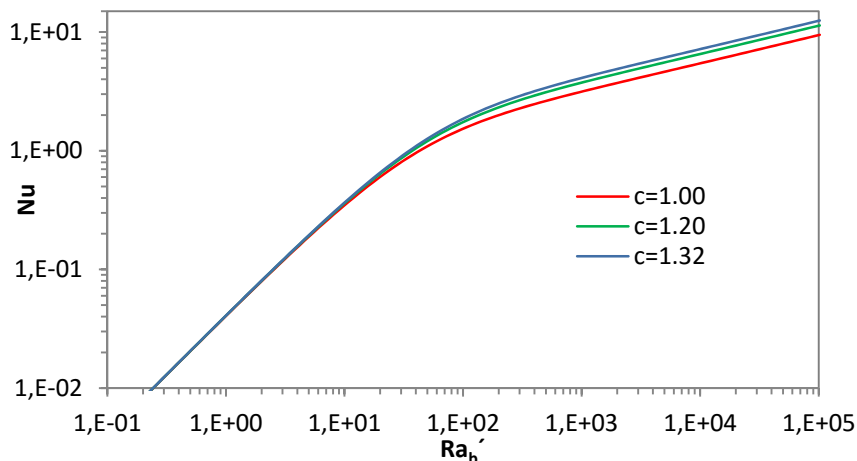


Figura 5.10 – Nu para el caso de placas isotermas con diferentes valores de coeficiente de ajuste c

La hipótesis de temperatura uniforme y simétrica permite resolver las ecuaciones de convección y simplificar el estudio experimental, pero no se cumple en las condiciones reales de las fachadas ventiladas. Manteniendo la simplificación de temperatura uniforme, existen correlaciones para el caso de valores asimétricos para las dos

superficies. La correlación más precisa en este caso es la [5.23], determinada también por *Bar-Cohen y Rohsenow*^[33], y aplicable para el caso en el que una de las superficies se comporta de forma adiabática.

$$Nu_b = \left[\frac{144}{(Ra'_b)^2} + \frac{2.873}{(Ra'_b)^{1/2}} \right]^{-1/2} \quad [5.23]$$

Otra hipótesis simplificativa que permite resolver el sistema de ecuaciones del proceso de convección es suponer una distribución de flujo de calor uniforme en las superficies. En este caso, la correlación que plantea *Rohsenow*^[26,27] es la indicada en [5.24], donde se pueden tomar los valores de $c = 1.15$ y $c = 1.07$, y $c = 1$ correspondería al valor asintótico correspondiente al caso de placas aisladas. En este caso el número de Ra'' se define según [5.25].

$$Nu_b = \left[(Nu_{fd})^{-3.5} + (Nu_p)^{-3.5} \right]^{-1/3.5}$$

$$Nu_{fd} = 0.29(Ra''_b)^{1/2} \quad [5.24]$$

$$Nu_p = cH_l(Ra''_b)^{1/5}$$

$$H_l = \frac{6}{5} \cdot \left(\frac{Pr}{4 + 9\sqrt{Pr} + 10Pr} \right)^{1/5}$$

$$Ra''_b = \frac{g\beta q_s b^4}{\nu\alpha\lambda(H/b)} \quad [5.25]$$

Y para el caso de flujo asimétrico la correlación de Nu ^[62,66] se ajusta a la mostrada en [5.26]. En esta expresión el valor Nu se define respecto a la temperatura de las superficies a media altura del canal, como se indica en [5.27].

$$Nu_{b,T_{H/2}} = \left[\frac{12}{Ra''_b} + \frac{1.88}{(Ra''_b)^{2/5}} \right]^{-1/2} \quad [5.26]$$

$$Nu_{b,T_{H/2}} = \frac{q_s b}{T_{H/2} - T_\infty \lambda} \quad [5.27]$$

En la Figura 5.11 se muestra la comparativa entre el conjunto de correlaciones planteadas anteriormente para ambas hipótesis, temperatura o flujo uniforme, y para los casos de comportamiento simétrico de ambas superficies o condiciones asimétricas. Se puede observar que la mayor diferencia en los valores de Nu se producen para Ra bajos. Estos valores de referencia se comparan más adelante con los resultados experimentales de la fachada ensayada. Para definir de forma completa el proceso de transmisión de calor dentro de la cámara ventilada es necesario conocer también el caudal de aire que se produce en el proceso de convección natural. De forma análoga a las correlaciones que se definen para obtener el coeficiente de convección h a través del valor de Nu se puede determinar el caudal másico m a través del número de Re .

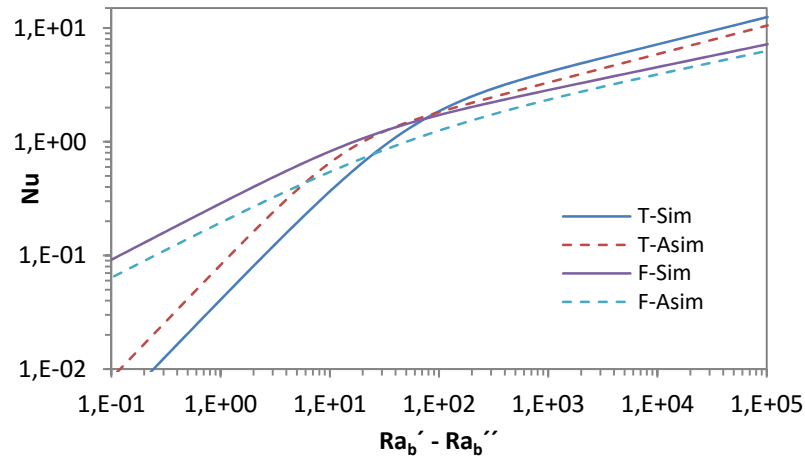


Figura 5.11 –Nu para hipótesis de temperatura y flujo uniforme y para condiciones simétricas y asimétricas

En el caso de flujo completamente desarrollado, la caída de presión dentro de la cámara de aire se ajusta a las ecuaciones convencionales de pérdida de carga en conductos mediante un coeficiente de fricción, ecuación [5.28], donde f_{ap} es el coeficiente de fricción aparente de Darcy. Esta caída de presión debe estar equilibrada con las fuerzas de flotación debidas a la convección natural, que si se sigue empleando la aproximación de Boussinesq, se puede expresar de la forma [5.29], para el caso de temperatura uniforme y simétrica en las superficies de la cámara ventilada.

$$\Delta p = f_{ap} \frac{H}{4b^3 \rho} \dot{m}^2 \quad [5.28]$$

$$\Delta p = \rho g \beta H (T_s - T_\infty) \quad [5.29]$$

Si se combinan ambas ecuaciones, [5.28] y [5.29], y se expresa el resultado de forma adimensional se obtiene la correlación buscada, [5.30]. Donde el término de fricción es función de Re y de la longitud del flujo x^+ desarrollado según la expresión [5.31].

$$\frac{\dot{m}}{\rho \alpha} = \left(\frac{4Ra_b' Pr}{f_{ap}} (H/b) \right)^{1/2} \quad [5.30]$$

$$\frac{f_{ap} Re}{4} = \frac{3.44}{(x^+)^{1/2}} \frac{24 + 0.674/(4x^+) - 3.44/(x^+)^{1/2}}{1 + 2.9 \cdot 10^{-5} (x^+)^{-2}} \quad [5.31]$$

$$x^+ = \frac{H/2b}{Re}$$

Para el caso de flujo en desarrollo, el término de caudal se obtiene del análisis de semejanza del proceso de convección en placa plana. El caudal circulante es función del perfil de velocidades que se forma en la capa límite y del espesor de dicha capa. Las correlaciones adimensionales de estos dos términos tienen la forma indicada en [5.32].

$$v \propto \frac{\alpha}{H} Pr^{1/2} (Ra'_H)^{1/2} \quad [5.32]$$

$$\delta_v \propto H Pr^{-1/4} (Ra'_H)^{-1/4}$$

Combinando ambas ecuaciones y reemplazando el número de Ra_H por el de Ra_b , se obtiene la correlación [5.33].

$$\frac{\dot{m}}{\rho \alpha} \propto (Ra'_b)^{1/4} Pr^{1/4} (H/b) \quad [5.33]$$

Combinando las ecuaciones [5.30] y [5.33] se obtiene la expresión final [5.34], donde la ecuación se ajusta a los datos experimentales disponibles^[66,17,81,82,139,263,334,345]. En el caso de la determinación del caudal circulante, la correlación presenta una forma implícita mediante la resolución conjunta de la pareja de ecuaciones [5.31] y [5.34]. Pero la solución de dicho sistema de ecuaciones es sencilla y se alcanza rápidamente mediante un proceso iterativo. Para flujo uniforme y simétrico se obtiene la expresión ajustada [5.35].

$$Re = \frac{2}{Pr} \left(\frac{1}{\left(\frac{4Ra'_b Pr}{f_{ap}} \left(\frac{H}{b} \right) \right)^{0.81/2}} + \frac{1}{(6.6(Ra'_b)^{1/4} Pr^{1/4} \left(\frac{H}{b} \right))^{0.81}} \right)^{-\frac{1}{0.81}} \quad [5.34]$$

$$Re = \frac{2}{Pr} \left(\frac{1}{\left(\frac{4Ra'_b Pr}{f_{ap}} (H/b) \right)^{2.4/3}} + \frac{1}{(1.5(Ra'_b)^{1/5} Pr^{1/5} (H/b))^{2.4}} \right)^{-1/2.4} \quad [5.35]$$

En las correlaciones anteriores, el término de variación de presión en la cámara ventilada sólo tiene en cuenta el empuje por flotación y las pérdidas internas por fricción. Otra formulación del flujo inducido por convección natural es la indicada por *Brinkworth*^[67,95, 304,320]. En el caso real del funcionamiento de las fachadas ventiladas, al término de empuje por flotación se le debe sumar el efecto del viento, de forma que la diferencia de presión tota en la cámara sería la indicada en [5.36]. Además, el término de flotación, Δp_f , se modifica respecto a la expresión [5.29], introduciendo el efecto del perfil de temperaturas mediante el parámetro S , que representa el gradiente en altura, y que toma valores entre $0 < S \leq 1$.

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_v$$

$$\Delta p_f = \rho g \beta H S (T_{sal} - T_{\infty}) \quad [5.36]$$

$$\Delta p_v = C_{ent} \left(\frac{\rho g V_{ent}^2}{2} \right) - C_{sal} \left(\frac{\rho g V_{sal}^2}{2} \right)$$

Por otro lado, en el término de pérdidas de carga que se oponen a las componentes de empuje, además del término de fricción que se generan en el desarrollo del movimiento de aire a lo largo de la cámara ventilada, se debería tener en cuenta las pérdidas debidas a la geometría de entrada y salida de dicha cámara. De esta forma el término de pérdidas de carga queda de la forma [5.37].

$$\Delta p = \Delta p_{fr} + \Delta p_h$$

$$\Delta p_{fr} = f_{ap} \left(\frac{H}{2b} \right) \frac{\rho u^2}{2} \quad [5.37]$$

$$\Delta p_h = \left(\sum k_h \right) \frac{\rho u^2}{2}$$

Si se igualan ambos términos de presión, ecuaciones [5.36] y [5.37], y se expresa en forma adimensional se obtiene la expresión [5.38] donde el factor A corresponde al término de flotación, y el factor B es el término de los efectos del viento, [5.39].

$$A(x^+)^3 + B(x^+)^2 - 0.5 \left[(f_{ap} Re_b) x^+ + \sum k_h \right] = 0 \quad [5.38]$$

$$A = \frac{2SGr_{qs}}{Pr}$$

$$Gr_{qs} = \frac{g\beta q_s (2b)^5}{H\nu^2 \lambda} \quad [5.39]$$

$$B = \frac{\Delta p_V (2b)^4}{\rho \nu^2 H^2}$$

Si se toma la relación simplificada para determinar las pérdidas por fricción, válida para el caso de flujo laminar, y se toma los valores de $S = 0.5$ y $\sum k_h = 1$, se obtiene la expresión [5.41].

$$f_{ap} Re_b = 96 + 0.674/x^+ \quad [5.40]$$

$$\frac{Gr_{qs}}{0.71} (x^+)^3 - 48x^+ - 0.837 = 0 \quad [5.41]$$

Si se determina el caudal másico obtenido por las diferentes correlaciones definidas se obtiene el resultado mostrado en la Figura 5.12. Para el caso de condiciones asimétricas no existen correlaciones validadas. Una vez evaluadas las diferentes correlaciones que existen para el cálculo del comportamiento térmico de flujos laminares entre placas planas, se puede concluir que existe una divergencia importante entre los resultados que se obtienen en función de la hipótesis de trabajo que se adopten, ya se considere temperatura superficial o flujo uniforme en las superficies que conforman la cámara ventilada, y si se suponen condiciones simétricas o asimétricas. Además, hay que tener en cuenta que en el caso de las correlaciones para el cálculo del caudal se deben presuponer ciertos coeficientes, como por ejemplo, los correspondientes a las pérdidas

de carga, lo que hace que los valores estimados se puedan alejar del comportamiento real de la fachada. Por tanto, en el apartado 5.2.3.1 se van a comparar los datos experimentales con los modelos teóricos para evaluar su precisión y ajustarlos al comportamiento real de los prototipos de fachadas ventiladas. Pero antes es necesario completar los datos experimentales con un modelo de volúmenes finitos que se desarrolla en el siguiente apartado.

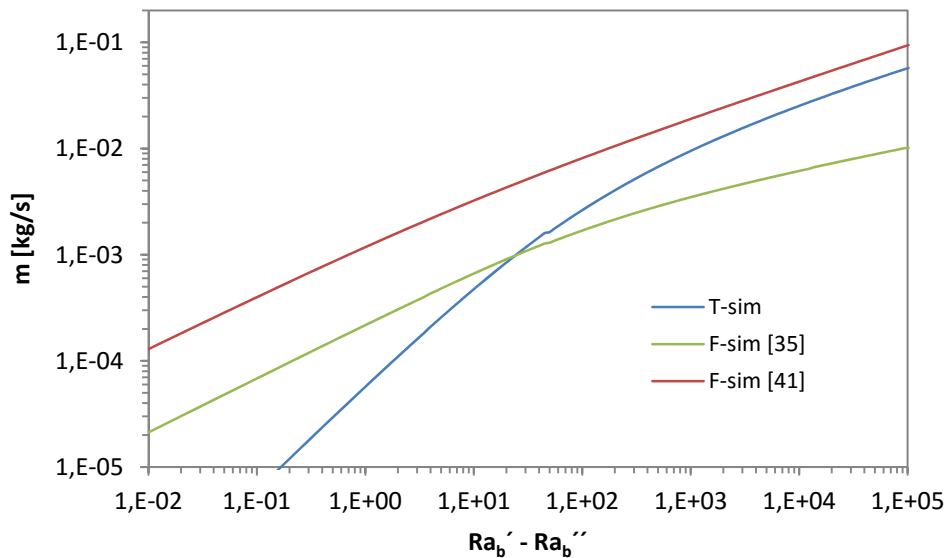


Figura 5.12 –Caudal másico para las hipótesis de temperatura y flujo uniforme y condiciones simétricas

5.2.2 Modelos CFD probeta de fachada ventilada

Debido a que los datos experimentales están limitados por la posibilidad y fiabilidad de instalación de las sondas en la muestra, los resultados obtenidos se van a complementar con un modelo de volúmenes finitos que permita conocer los parámetros necesarios para caracterizar el comportamiento térmico de la cámara ventilada. Los datos registrados de temperatura y velocidad del aire corresponden a medidas puntuales, cuando los modelos de ventilación necesitan valores integrados de los perfiles. El modelo de volúmenes finitos se emplea para obtener los factores de corrección de dichos parámetros. Este cálculo es una de las aportaciones científicas del presente trabajo de tesis. El modelo se realiza en la herramienta *Fluent*®. El número de elementos que conforman la malla, en dichos modelos, es determinante en la calidad de los resultados que se obtienen. Pero a su vez, el esfuerzo computacional se dispara si este número es muy elevado y más si el cálculo se realiza de forma dinámica. Se ha definido una malla de características variables, la densidad de elementos es mayor, y el tamaño de estos es menor, en las zonas próximas a las superficies en la entrada y salida de la cámara ventilada y en la proximidad a las superficies. De forma que se tiene una buena definición en las zonas de capa límite y en las zonas en las que se produce una variación rápida de las variables físicas. En la Tabla 5.5 se recogen las características de la malla definida para la fachada ventilada en estudio. Se ha llevado a cabo un estudio de sensibilidad del tamaño de malla para obtener el tamaño más pequeño que no modifica los resultados^[34].

Malla FV-LIGERA

Elementos	166.907
Tamaño [mm]	0,2 a 5
Boundary layer	0,2/1,2/10
Equi Angle Skew [0-0,1]	100%
Aspect Ratio [1-5]	93,1%

Tabla 5.5 – Características de la malla del modelo de volúmenes finitos para la fachada ventilada ligera

En la Figura 5.13 se muestran los detalles de la malla correspondiente al modelo de la fachada ventilada ligera desarrollado. Como se puede ver en la imagen, los modelos son 2D y contemplan la capa de aislante, la cámara de aire y la hoja exterior. Se imponen como condiciones de contorno la temperatura en la cara interior del aislante y la temperatura de aire exterior, junto con la radiación solar sobre la superficie vertical. En la Tabla 5.6 se recogen las características de la parte matemática del modelo. Para validar los resultados se simulan cinco días correspondientes al periodo de ensayos en la celda *PASLINK*; para el caso de la fachada ligera bajo estudio, se toma el intervalo que va del 15 al 19 de mayo.

Datos simulación

Flotación	Boussinesq
Turbulencia	Laminar
Radiación	DO
Time step [seg]	600
Tiempo simulado [h]	120
Iteraciones	720

Tabla 5.6 – Características del modelo de volúmenes finitos en la tipología de fachada ventilada ligera

A continuación se muestran los resultados obtenidos por los modelos de volúmenes finitos respecto a las medidas experimentales registradas durante los ensayos. En la Tabla 5.7 se recogen los errores medios absolutos para cada temperatura y para la velocidad de aire en cada capa de la cámara ventilada y en cada punto de medida en la muestra.

Error Abs Velocidad [m/s]

		Altura [m]			
		0,05	0,30	1,35	2,60
FV-L		0,02	0,03	0,02	0,04

Error Abs Temperatura [°C]

		Altura [m]			
Capa		0,05	0,30	1,35	2,60
FV-L	5	1,0	0,8	0,8	0,9
	ca	0,4	0,5	0,8	0,9
	6	0,9	0,9	0,9	1,4

Tabla 5.7 – Error absoluto del modelo de volúmenes finitos en la tipología de fachada ventilada ligera

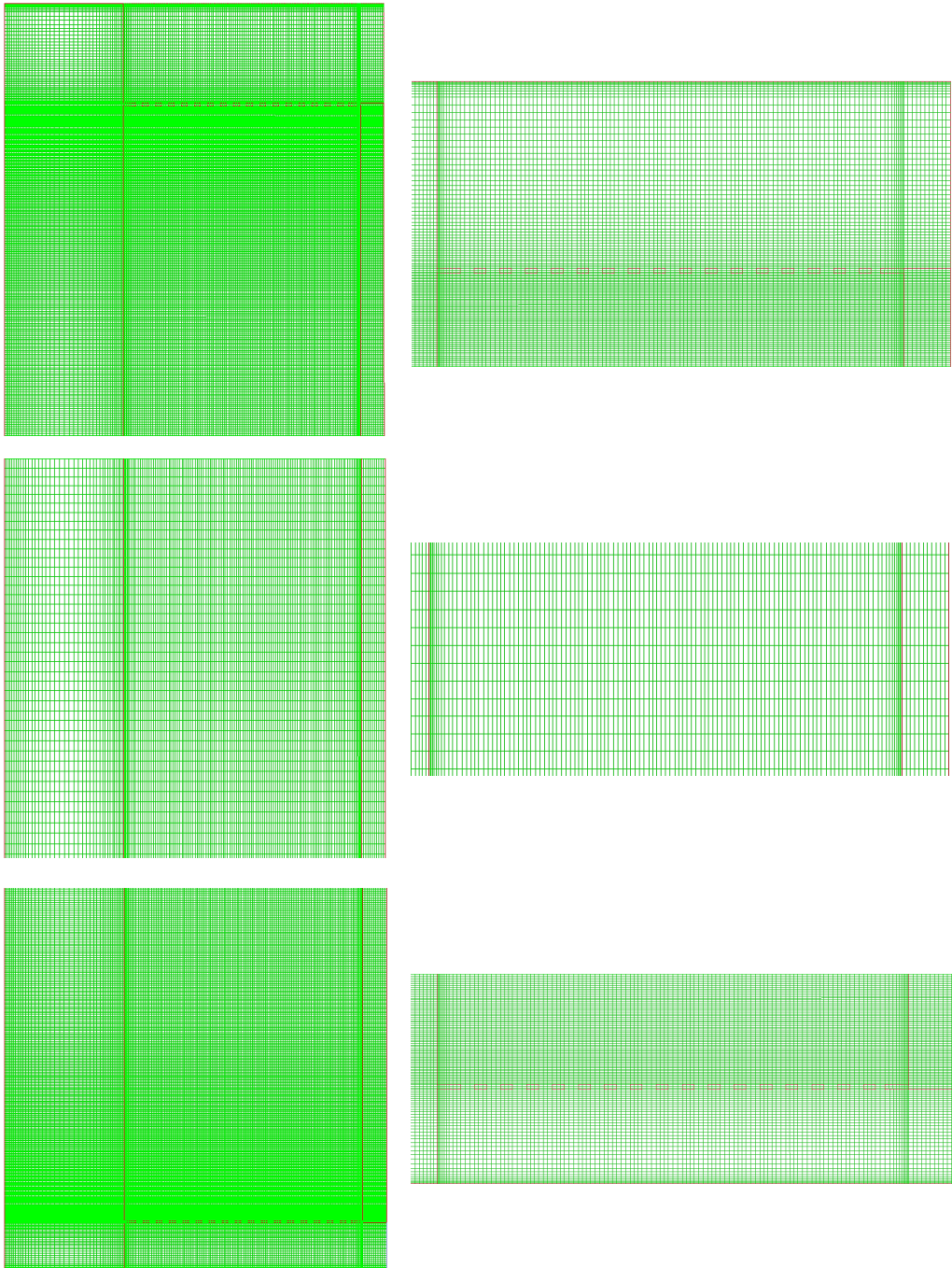


Figura 5.13 –Definición de la malla del modelo de volúmenes finitos de la fachada ventilada ligera

En el caso de las velocidades, el error de los modelos es inferior a $e_{abs} < 0,05$ [m/s], y para las temperaturas el error es inferior a $e_{abs} < 1$ [°C], por lo que se puede considerar que el modelo es válido para el estudio. En la Figura 5.14 y Figura 5.15 se puede ver, como ejemplo, la comparativa en las temperaturas y velocidad en la cámara ventilada en el punto central, altura 1,35 [m]. La comparación en el resto de puntos de medida de la muestra se recoge en el Anexo D.

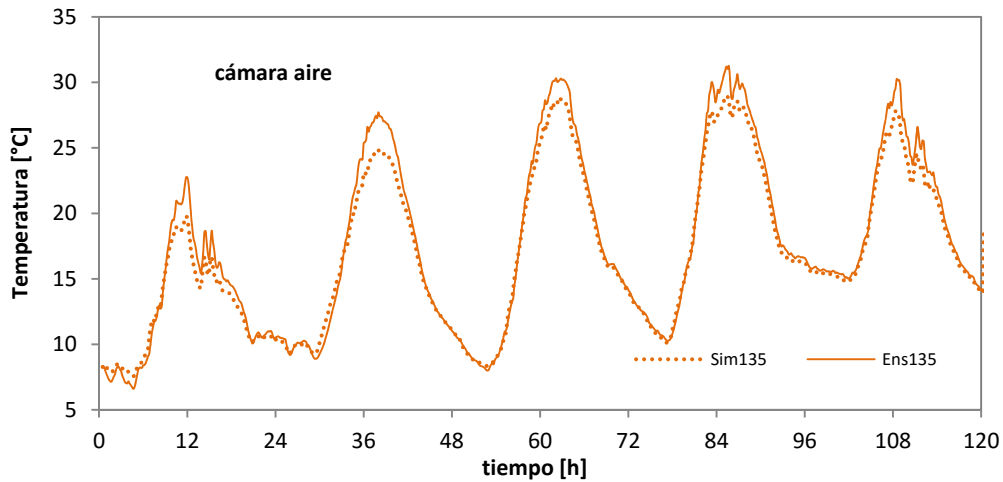


Figura 5.14 – Validación del modelo de volúmenes finitos para la fachada ventilada ligera

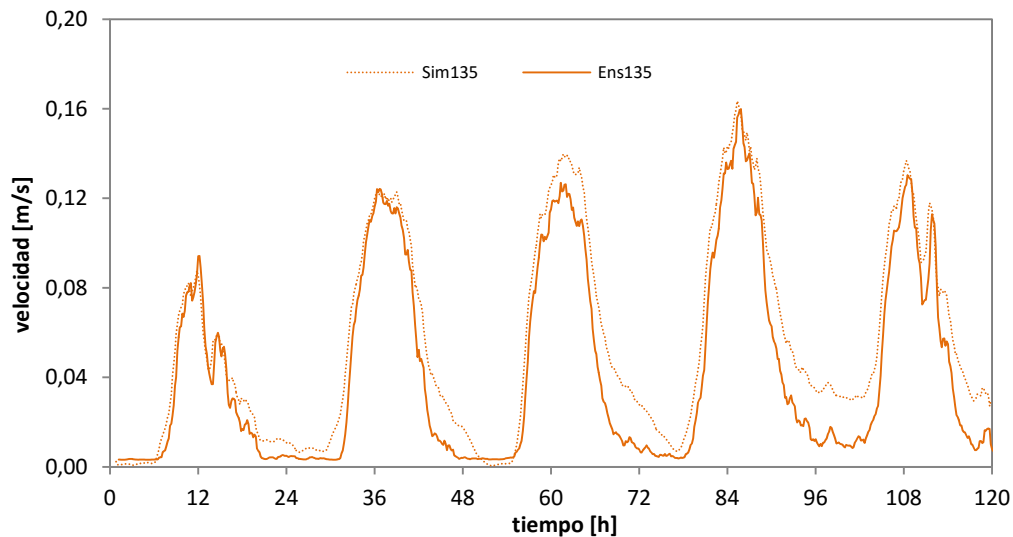


Figura 5.15 – Validación del modelo de volúmenes finitos para la fachada ventilada ligera

En los modelos de *CFD* se suele imponer como condiciones de contorno en las secciones de entrada y salida una presión diferencial nula. Pero esta definición no da como resultado el mejor ajuste respecto a los datos experimentales. En el modelo final se emplea una curva de diferencia de presión cúbica en función de la velocidad de aire dentro de la cámara ventilada. Los valores de presión mínima y máxima óptimos de dicha función se obtienen mediante un análisis paramétrico, minimizando el residuo. Estos resultados muestran la importancia de disponer de las medidas de presión en el ensayo de fachadas ventiladas, por lo que en los siguientes ensayos se introduce esta medida en la fase experimental. Una vez validados los modelos de volúmenes finitos se puede pasar a realizar un estudio más completo del comportamiento de las dos fachadas ventiladas. Como ejemplo se analizan con detalle cuatro instantes de tiempo, dos durante el periodo de calentamiento y dos durante el periodo de enfriamiento de la hoja exterior de la fachada ventilada, que dan una imagen clara de la evolución de la cámara. En la Figura 5.16 se muestra el campo de temperaturas y de velocidades que se generan en la fachada para el instante $t = 60$ [h], que corresponde con las 11:40 [h] del mediodía, y $t = 66$ [h], que corresponde con las 17:40 [h] de la tarde. En la Figura 5.17 se recogen los instantes $t = 72$ [h], que corresponde con las 23:40 [h] de la noche, y $t = 78$ [h], que corresponde con las 5:40 [h] de la madrugada.

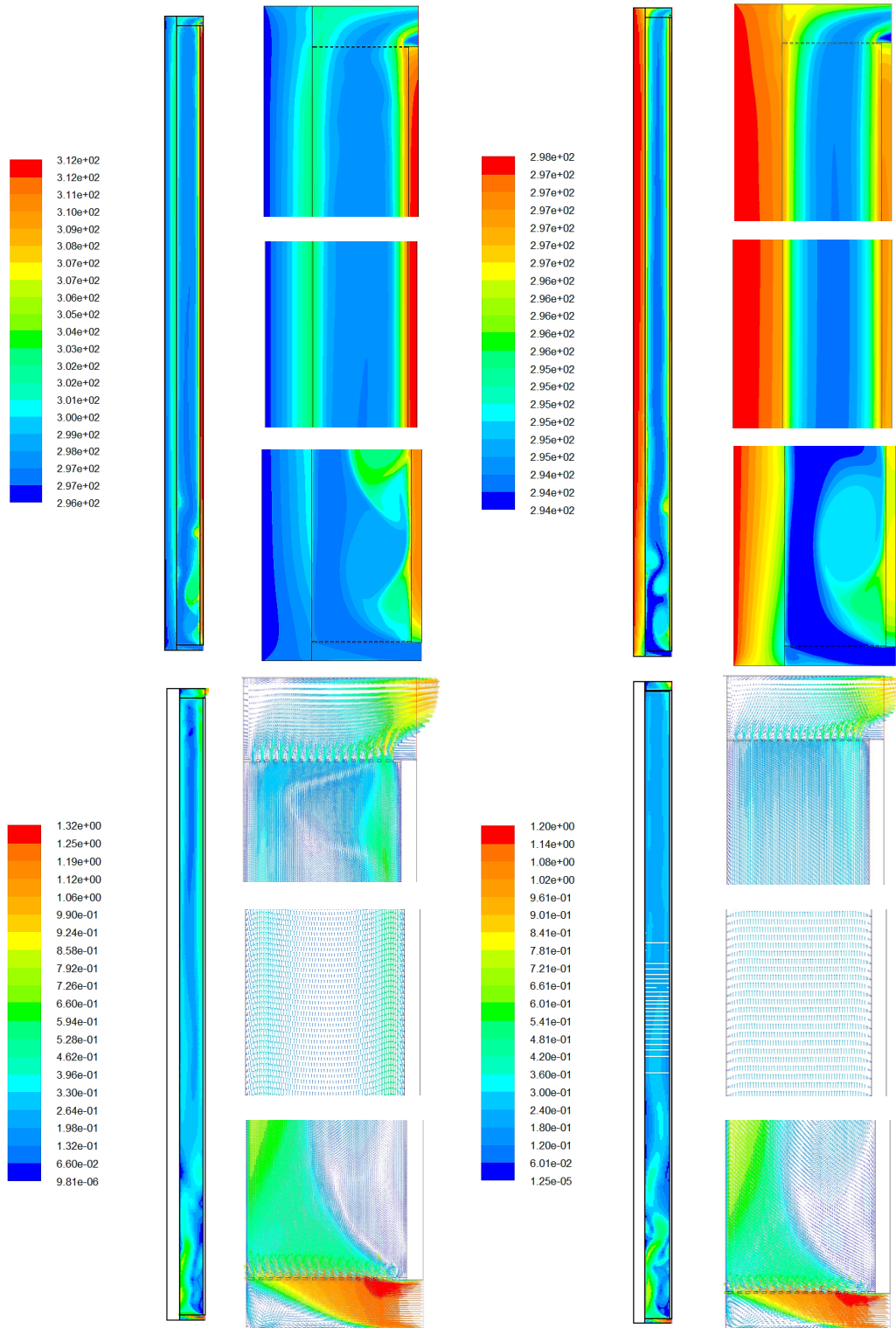


Figura 5.16 – Campo temperaturas y velocidades para instantes de tiempo $t=60$ [h], izquierda, y $t=66$ [h], derecha

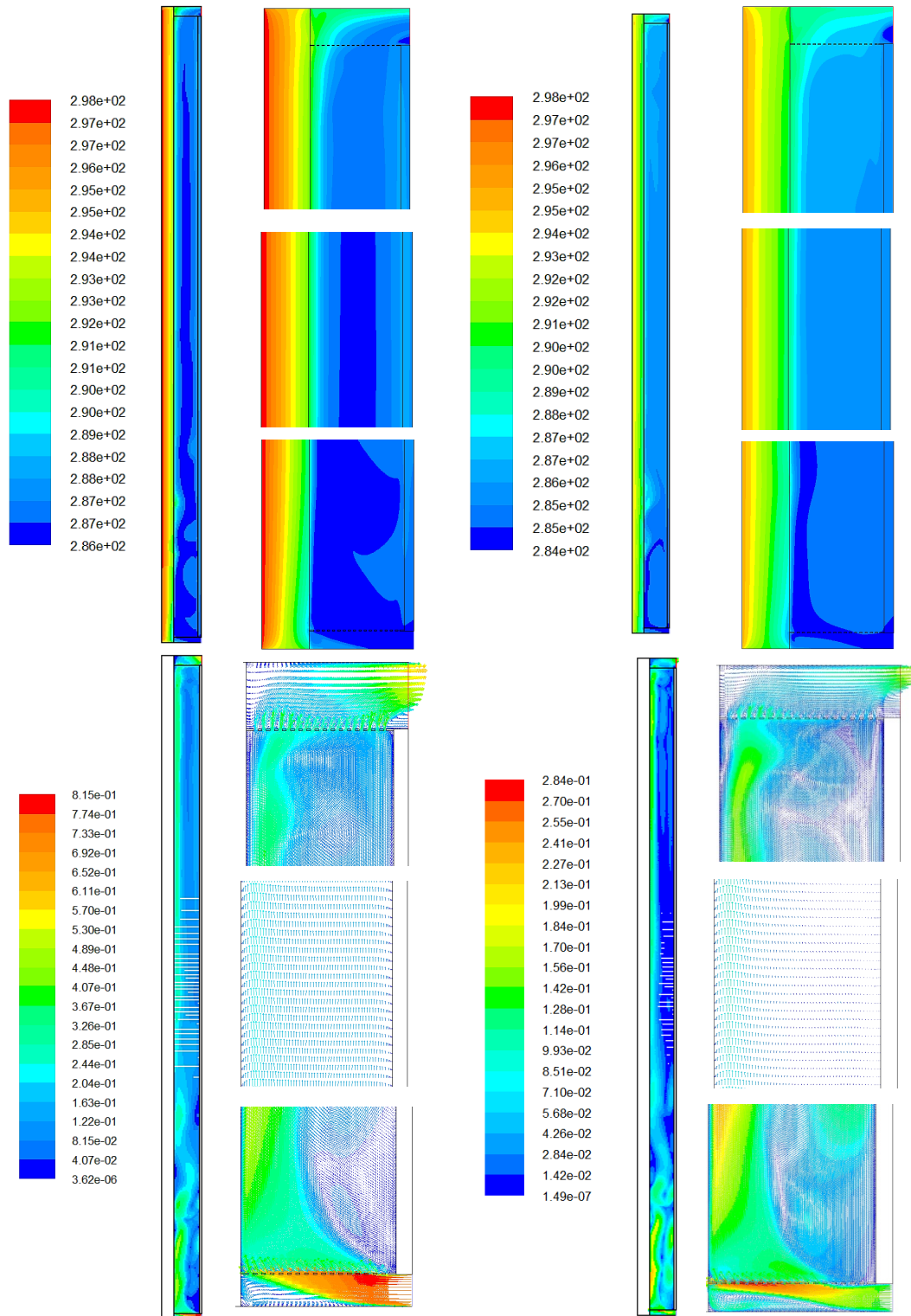


Figura 5.17 – Campo temperaturas y velocidades para instantes de tiempo $t=72$ [h], izquierda, y $t=78$ [h], derecha

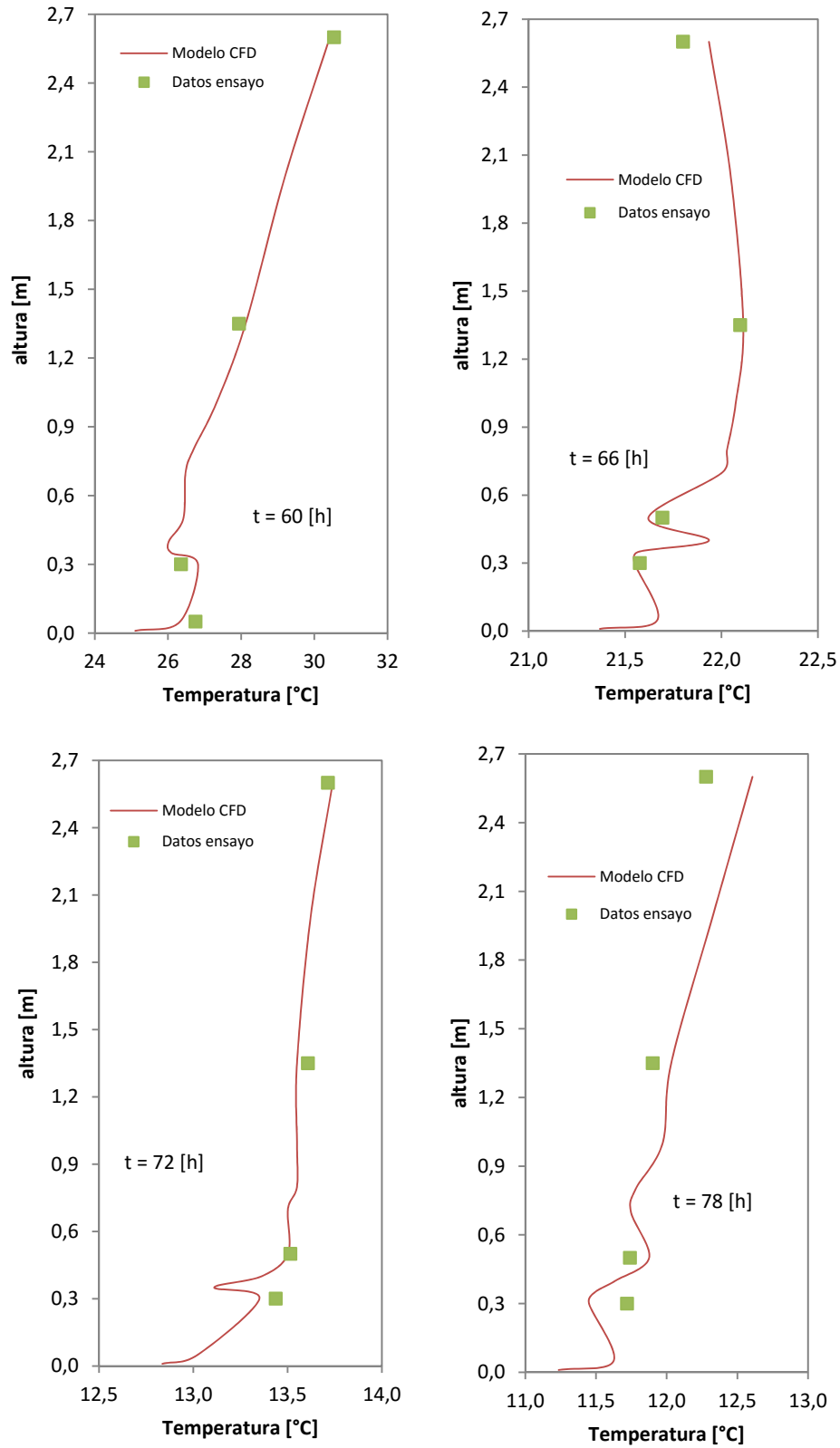


Figura 5.18 – Comparativa entre el modelo de CFD y los datos experimentales para la temperatura

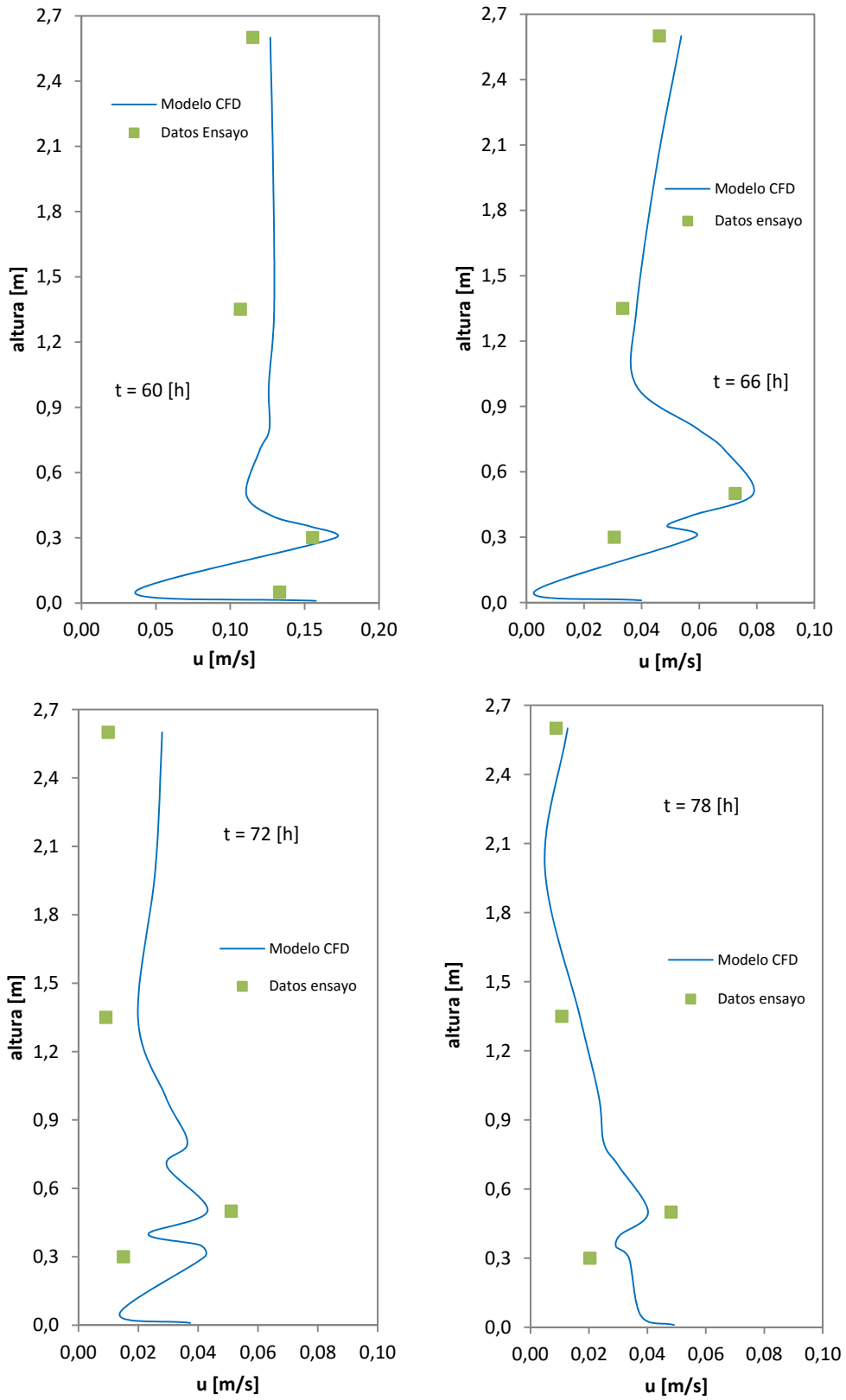


Figura 5.19 – Comparativa el modelo de CFD y datos experimentales para componente vertical de velocidad

En la Figura 5.18 y Figura 5.19 se realiza una comparativa de los perfiles verticales en el eje central de la cámara ventilada obtenidos por el modelo de *CFD* respecto a los puntos de medida del ensayo. Una vez validado el modelo de *CFD*, se pasa a estudiar los perfiles horizontales de temperatura en cada una de las alturas medidas, de forma que se puede determinar los factores de corrección de los datos experimentales para calcular posteriormente la temperatura equivalente en cada sección, ver Figura 5.20. Para la determinación del caudal efectivo circulante por la cámara ventilada, se emplea la medida a media altura, 1,35 [m], donde no existen efectos de distorsión producidos por la entrada y la salida. En este plano se determina el factor de corrección del perfil de velocidades respecto a la medida realizada por la sonda en el eje central de la cámara. Los perfiles de velocidad que se obtienen para los distintos instantes de tiempo se muestran en la Figura 5.21. Para completar el análisis se muestra también los perfiles de temperatura en dichos instantes de tiempo, extraídos de la Figura 5.20.

tiempo [h]	T_{ext} [°C]	T_{ca} [°C]	T_{c5} [°C]	T_{c6} [°C]	U_{135} [m/s]	Γ	f_{va}
60	24,04	27,90	28,52	32,26	0,107	0,859	1,327
66	21,04	21,79	22,13	22,00	0,033	-0,392	1,063
72	13,07	13,57	14,69	13,04	0,009	-1,472	1,212
78	11,99	11,91	13,09	11,37	0,011	-1,461	1,227

Tabla 5.8 – Factores de corrección de la velocidad en la cámara ventilada

En la Tabla 5.8 se recogen, como ejemplo, las condiciones de temperatura y velocidad que se dan en los cuatro instantes de tiempo que se están analizando. En la columna f_{va} se indica el factor de corrección de la velocidad medida respecto a la velocidad eficiente, obtenida de integrar el perfil de velocidades en toda la sección de la cámara ventilada. En el Anexo D se incluye la tabla completa de todos los resultados disponibles, que se corresponden con 60 instantes de tiempo, obtenidos de analizar los datos cada dos horas en los cinco días en los que se ha realizado la simulación en *CFD*. Se puede observar cómo la forma de los perfiles de velocidad en la cámara ventilada tienen una correlación directa con la forma de los perfiles de temperatura. Para poder asociar dicho efecto se define el factor Γ , ecuación [5.42], que engloba el efecto de las temperaturas medias de ambas superficies de la cámara, T_{c5} y T_{c6} . Además, el factor tiene en cuenta cuál de dichas superficies es la más caliente, a través del signo. Y por último se utiliza el dato de la temperatura exterior, T_{ext} , que afecta directamente en la temperatura que alcanzará el aire dentro de la cámara.

$$\Gamma = \frac{T_{c6} - T_{c5}}{[\max(T_{c6} - T_{c5}) - T_{ext}]} \quad [5.42]$$

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	Var. Comp.	%
TOTAL (CORRECTED)	0,635218	59			
Γ	0,635168	58	0,0109512	0,0107225	99,54
ERROR	0,00005	1	0,00005	0,00005	0,46

Tabla 5.9 – Análisis de componentes de varianza para el factor f_{va}

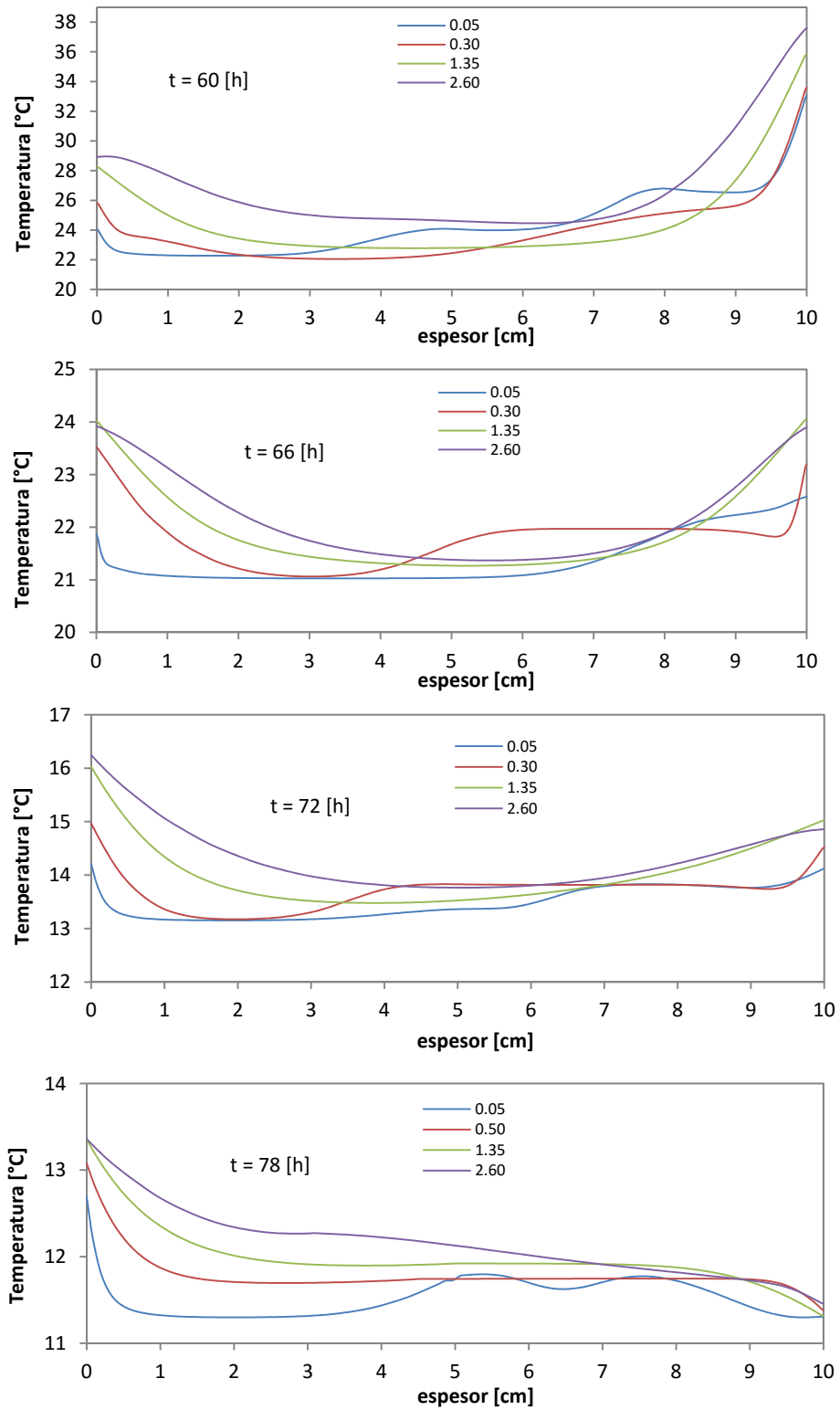


Figura 5.20 – Perfiles horizontales de temperatura

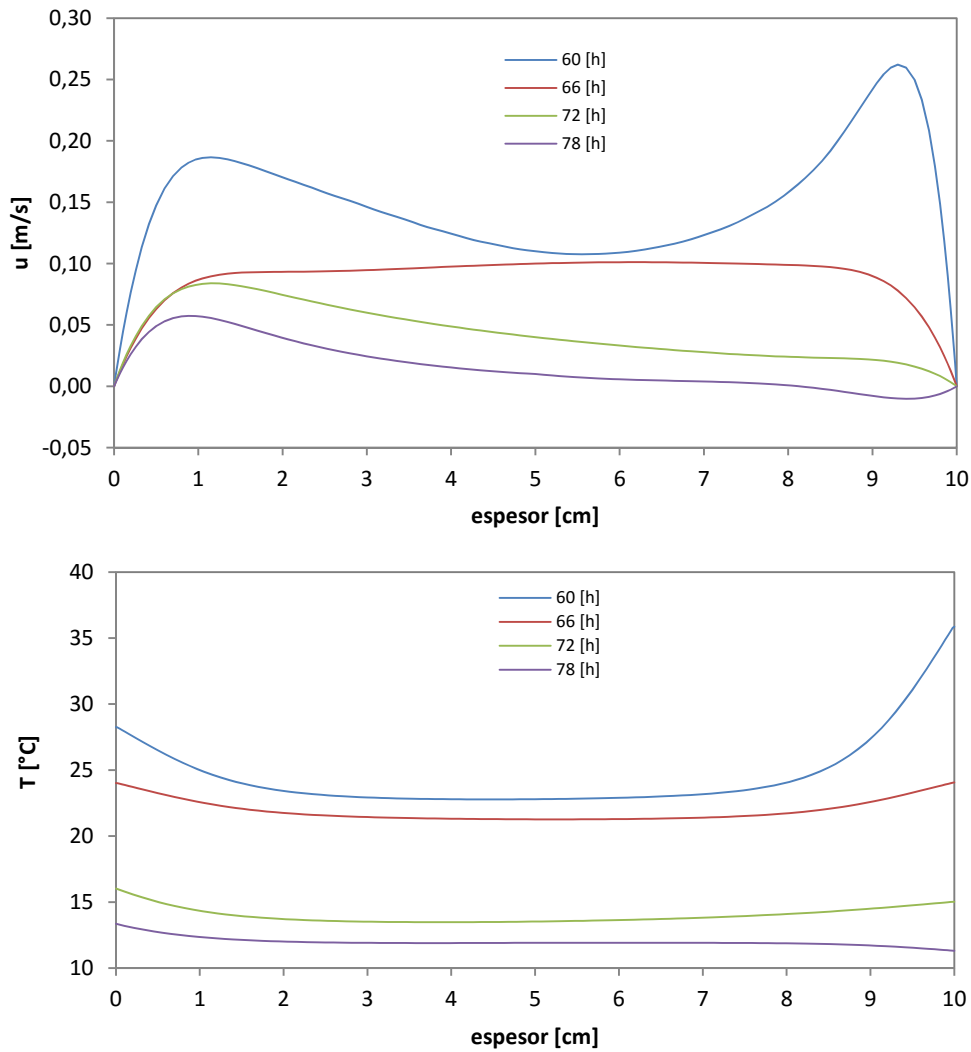


Figura 5.21 – Perfiles horizontales la componente vertical de la velocidad a la altura de 1,35 [m] para los distintos instantes de tiempo y comparativa con el perfil de temperaturas correspondiente

Ahora es necesario verificar si el factor definido es suficiente para explicar los diferentes factores de corrección f_{va} , o si por el contrario, existe alguna otra componente que afecte a dicho factor, como podría ser la propia magnitud de la velocidad dentro de la cámara. Para ello se realiza un análisis de varianza, ver tabla Tabla 5.9, y se obtiene que el factor definido explica en un 99,5% la variabilidad del factor f_{va} . Por lo que dicho parámetro se puede emplear para determinar el factor de corrección de la velocidad medida en el ensayo, en el cálculo del caudal circulante por la cámara ventilada. La ecuación que mejor se ajusta a los factores obtenidos del estudio es una gaussiana modificada exponencialmente, ver ecuación [5.43], que presenta una bondad de ajuste de $R^2 = 0,942$.

$$f_{va}(I) = 1,669 - 0,982e^{-(0,661 + \frac{\Gamma}{2,219})} \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad [5.43]$$

$$z = 2,293 + \frac{\Gamma}{0,604}$$

Donde el término integral se puede expresar de forma sencilla en relación a la función de error gaussiano, ecuación [5.44], que se encuentra implementada en un gran número de herramientas de cálculo, por lo que se simplifica su integración en los modelos matemáticos.

$$\int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) + 1}{2} \quad [5.44]$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

En la Figura 5.22 se muestra la función indicada junto a la banda de error del $\pm 5\%$, y los puntos obtenidos del estudio. La incertidumbre de cálculo del coeficiente de corrección de la ecuación de ajuste, respecto a los valores de cálculo, inferior a $e_{f_{va}} < 1,5\%$.

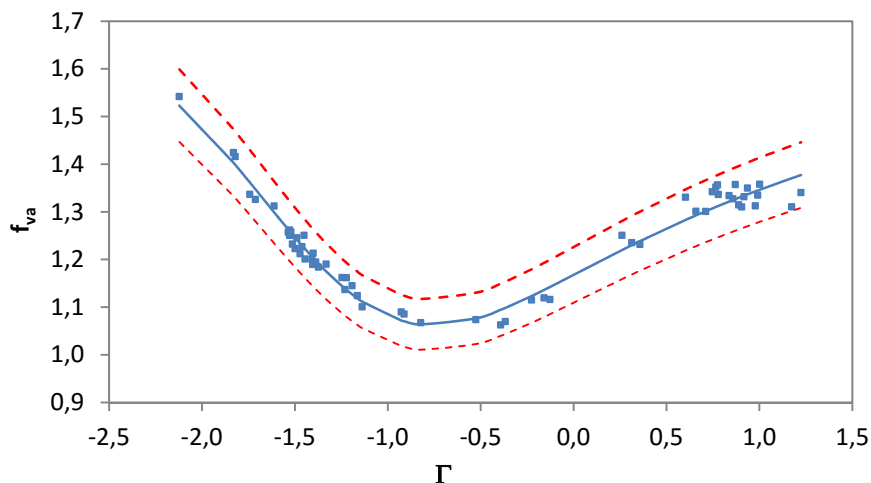


Figura 5.22 – Ecuación de correlación para el factor f_{va} en función del ratio de temperaturas Γ

En el caso de los perfiles de temperatura, se comprueba que la relación entre la temperatura eficiente respecto a la temperatura medida en el punto central, f_{Ta} , no depende de la forma del perfil, sólo de la posición en altura. En la Figura 5.23 se muestran los factores de corrección para cada uno de las posiciones de medida. Se puede tomar como válido un factor constante para cada altura, ya que la dispersión de puntos es reducida. Esta dispersión es más alta en el punto correspondiente a 0,30 [m] debido a la agitación del caudal de aire que se produce en la zona de entrada, pero aun así, el factor constante sigue siendo representativo. El error medio que se comete es inferior al 1,5%, siendo el error puntual máximo del 4%. Se puede apreciar que el factor de corrección de la temperatura es mayor con la altura en la cámara ventilada. Si se analiza esta relación se obtiene que dicho factor se ajusta de forma exacta a una ecuación exponencial, [5.45], con una bondad de ajuste de $R^2 = 0.99$, como se muestra en la gráfica inferior de la Figura 5.23.

$$f_{Ta}(y) = 1,069 - 0,0638e^{-1,864y} \quad [5.45]$$

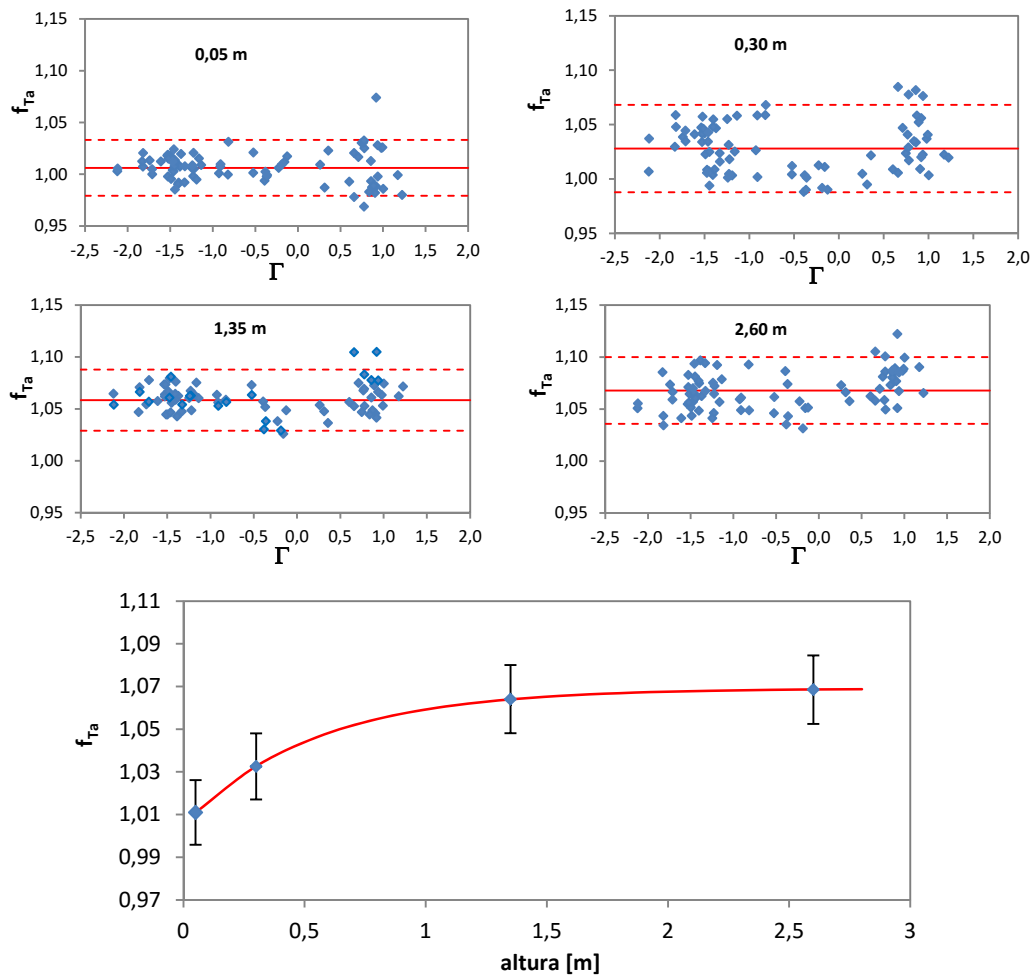


Figura 5.23 – Factor f_{Ta} en función de la altura en la cámara ventilada

Una vez que se conoce la relación entre los valores medidos de temperatura y velocidad con los valores efectivos, y con los flujos de calor obtenidos de modelo de celda *PASLINK*, ya se dispone de las herramientas necesarias para poder abordar el análisis del intercambio de calor en la cámara ventilada de la fachada.

5.2.3 Modelo experimental de fachada ventilada

El primer paso consiste en estudiar la ganancia de calor de la cortina de aire, comparando el comportamiento con las correlaciones estándar y verificar su validez. Y posteriormente, discriminar los flujos de calor intercambiados por cada una de las superficies de la cámara, para poder conocer con mayor precisión la repercusión de la fachada ventilada en la demanda energética de los edificios.

5.2.3.1 Modelo de convección

El calor absorbido por la cámara de aire se obtiene según la ecuación [5.46], donde se aplican los factores de corrección obtenidos para la velocidad y la temperatura. Donde el caudal circulante por la cámara ventilada se calcula a través de la velocidad y

condiciones del aire a media altura de la fachada, 1,35 [m], se considera la temperatura de salida la correspondiente a la altura de 2,60 [m], y para la temperatura de entrada se toma el valor de las condiciones del ambiente exterior. En la Figura 5.24 se muestran los resultados obtenidos.

$$Q_{ca} = \dot{m}_a \cdot c_p(T_a) \cdot [f_{Ta}(y) \cdot T_a^{260} - T_{ext}] \quad [5.46]$$

$$\dot{m}_a = f_{va}(\Gamma) \cdot v_a^{135} \cdot S \cdot \rho_a(T_a^{135})$$

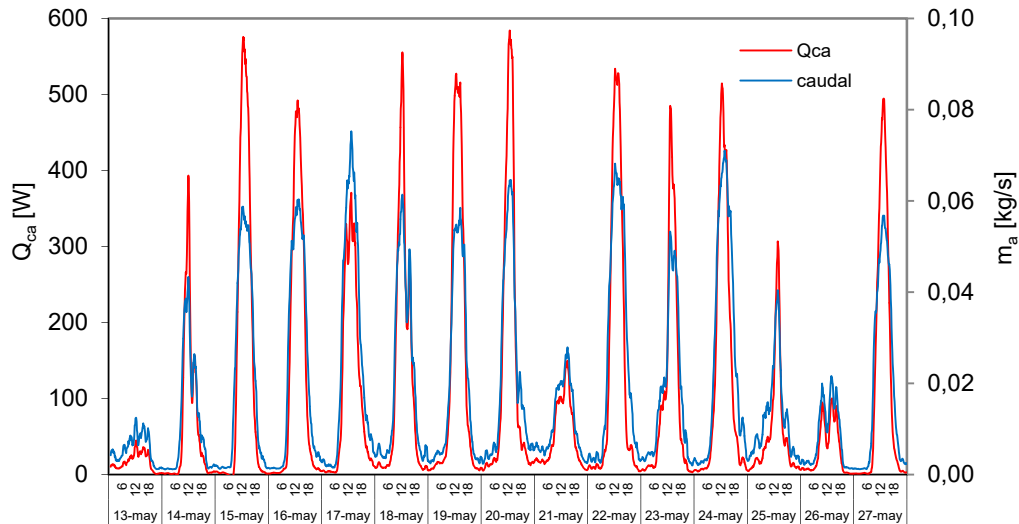


Figura 5.24 – Caudal de aire y calor absorbido en la cámara ventilada

Si se aplica la ecuación [5.10], tomando la temperatura de superficie como se indica en [5.47], se obtiene el coeficiente de convección para el aire, mostrado en la gráfica de la Figura 5.25.

$$T_s = \frac{\bar{T}_{c6} + \bar{T}_{c5}}{2} \quad [5.47]$$

$$h_{ca} = \frac{Q_{ca}}{S \cdot (T_s - T_{ext})}$$

A través de la ecuación [5.14] se obtiene el número de *Nusselt*, Nu_b , en cada instante de tiempo, empleando como longitud característica el espesor de la cámara de aire ventilada, ver Figura 5.26. Como ya se ha comentado, en todo ensayo experimental los resultados no tienen mucha validez si no van acompañados del estudio de incertidumbres asociado. Para ello se aplica la expresión de propagación de incertidumbres, ver [4.3]. Como ejemplo se muestra en la ecuación [5.48] el cálculo de la incertidumbre de medida del caudal de aire. En este cálculo se desprecian los términos de correlación, ya que se supone válida la hipótesis de variables independientes, y tampoco se tiene en cuenta el error en el cálculo de las propiedades del aire, ya que es muy inferior al error de las variables de medida.

$$u_{m_a}^2 = \left(\frac{\partial m_a}{\partial f_{va}}\right)^2 u_{f_{va}}^2 + \left(\frac{\partial m_a}{\partial v_a}\right)^2 u_{v_a}^2 + \left(\frac{\partial m_a}{\partial S}\right)^2 u_S^2 \quad [5.48]$$

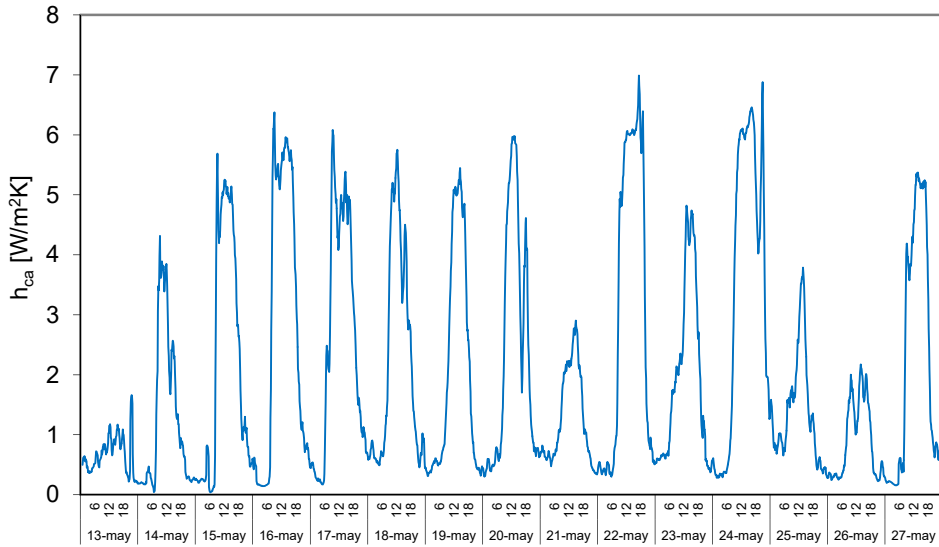


Figura 5.25 – Coeficiente de convección para el aire de la cámara ventilada

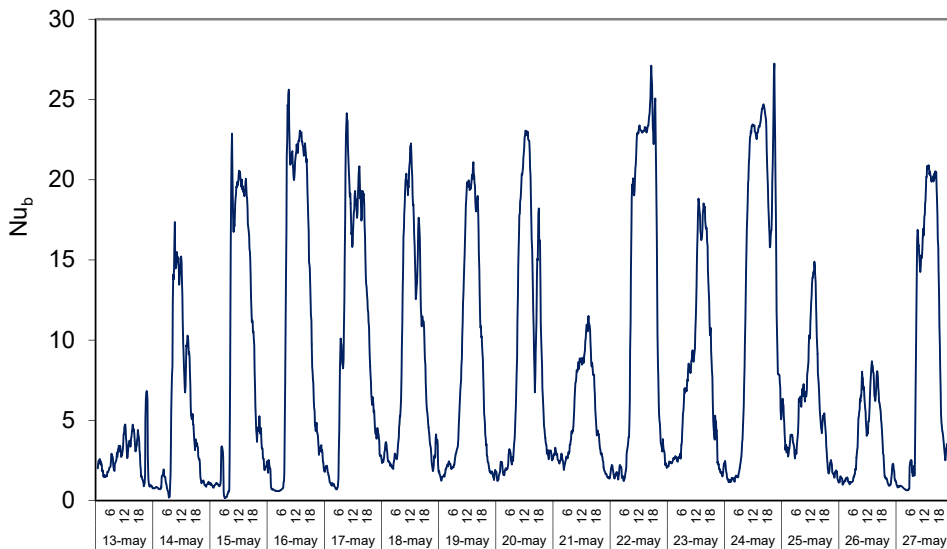


Figura 5.26 – Nu_b en el proceso de convección en el periodo de ensayo

En la Tabla 5.10 se recoge el error de cada una de las variables participantes. Los errores de las sondas se obtienen de la precisión de los instrumentos empleados en el ensayo junto con la incertidumbre de calibración. En cuanto a los factores de corrección, el error se estima de la dispersión de resultados obtenidos en el modelo numérico. Y en cuanto a la temperatura de superficie, el error se obtiene de ensayos previos realizados en el laboratorio, y tiene en cuenta el efecto de la resistencia de contacto de la colocación de las sondas y del efecto de la radiación sobre las mismas. Determinados los errores de cada una de las variables se aplica la expresión de propagación a todo el periodo de ensayo, calculando la incertidumbre del parámetro en estudio para cada instante, empleando como valor de referencia la incertidumbre media para todo el periodo. De esta forma se obtienen los resultados indicados en la Tabla 5.11. Los rangos obtenidos para las incertidumbres de medida son de un orden de magnitud aceptable y acotadas para obtener resultados viables del estudio.

variable	u_i
f_{va}	1,5 [%]
v_a	0,01 [m/s]
S	0,01 [m]
f_{Ta}	1,5 [%]
T_{sal}	0,2 [°C]
T_{ext}	0,5 [°C]
T_p	1 [°C]

Tabla 5.10 – Errores de medida de las variables de ensayo y cálculo

	u_i [%]
m_a	5,6
Q_{ca}	6,6
h_{ca}	12,8
Nu_b	15,2

Tabla 5.11 - Incertidumbres de los parámetros de convección

Una vez analizado el periodo de ensayo completo, para ver con más detalle el proceso, en la Figura 5.27 se muestra la evolución de los parámetros analizados para un día tipo.

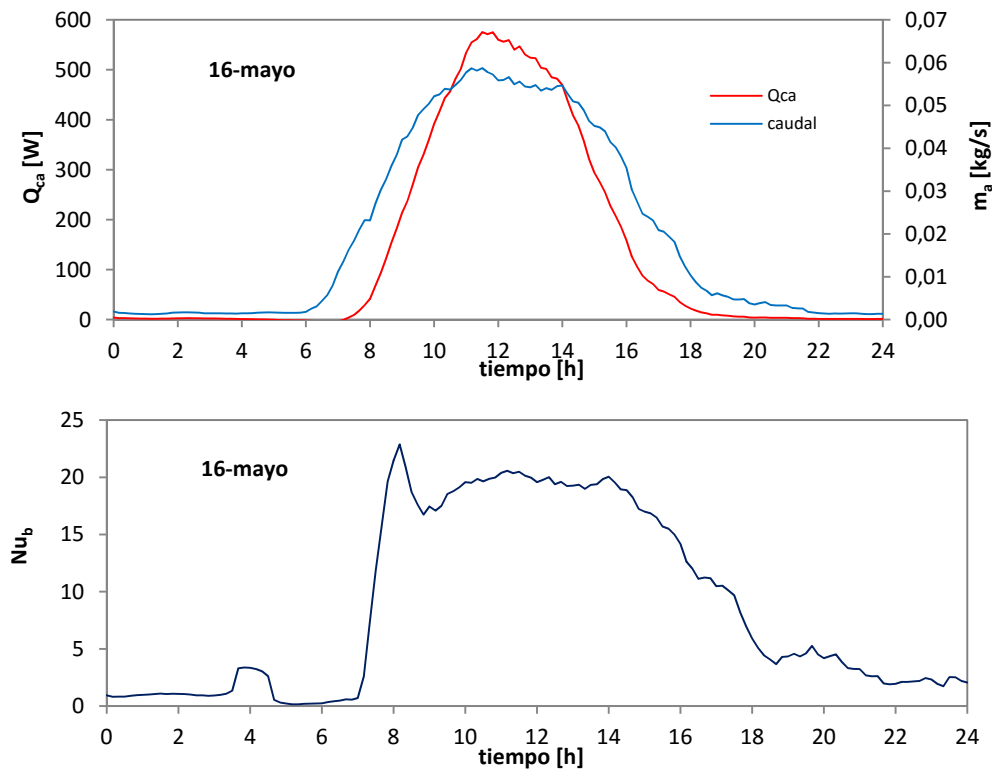


Figura 5.27 – Parámetros del proceso de convección en la cámara ventilada para el día 16 de mayo

Se puede ver que la cortina de aire de un paño de fachada de una superficie de $7,07 \text{ [m}^2\text{]}$, como la superficie que tiene la muestra, es capaz de absorber potencias, Q_{ca} , del orden de los 500 [W] , en los momentos de máxima radiación solar, con un total de energía absorbida a lo largo del día de $3,3 \text{ [kWh]}$. Estas potencias se asemejan a las demandas de ventilación de una vivienda estándar para la zona climática como la correspondiente a Vitoria-Gasteiz. Esto demuestra la potencialidad de aprovechamiento de las fachadas activas en la reducción de la demanda energética de los edificios de una forma renovable. Pero para poder utilizar esta capacidad de captación solar de las fachadas ventiladas es necesario disponer de modelos matemáticos que sean capaces de representar su comportamiento térmico de forma adecuada. En la fase de proyecto de un edificio, se puede calcular el comportamiento de la envolvente, con herramientas como *TRNSYS*, y su conexión con los sistemas de climatización, se puede llegar a diseñar edificios de consumo casi nulo. Este es el objetivo final del presente trabajo. Por tanto, es necesario comprobar si los modelos estándar de convección en placas planas son válidos para representar adecuadamente dicho comportamiento térmico en las soluciones reales de construcción.

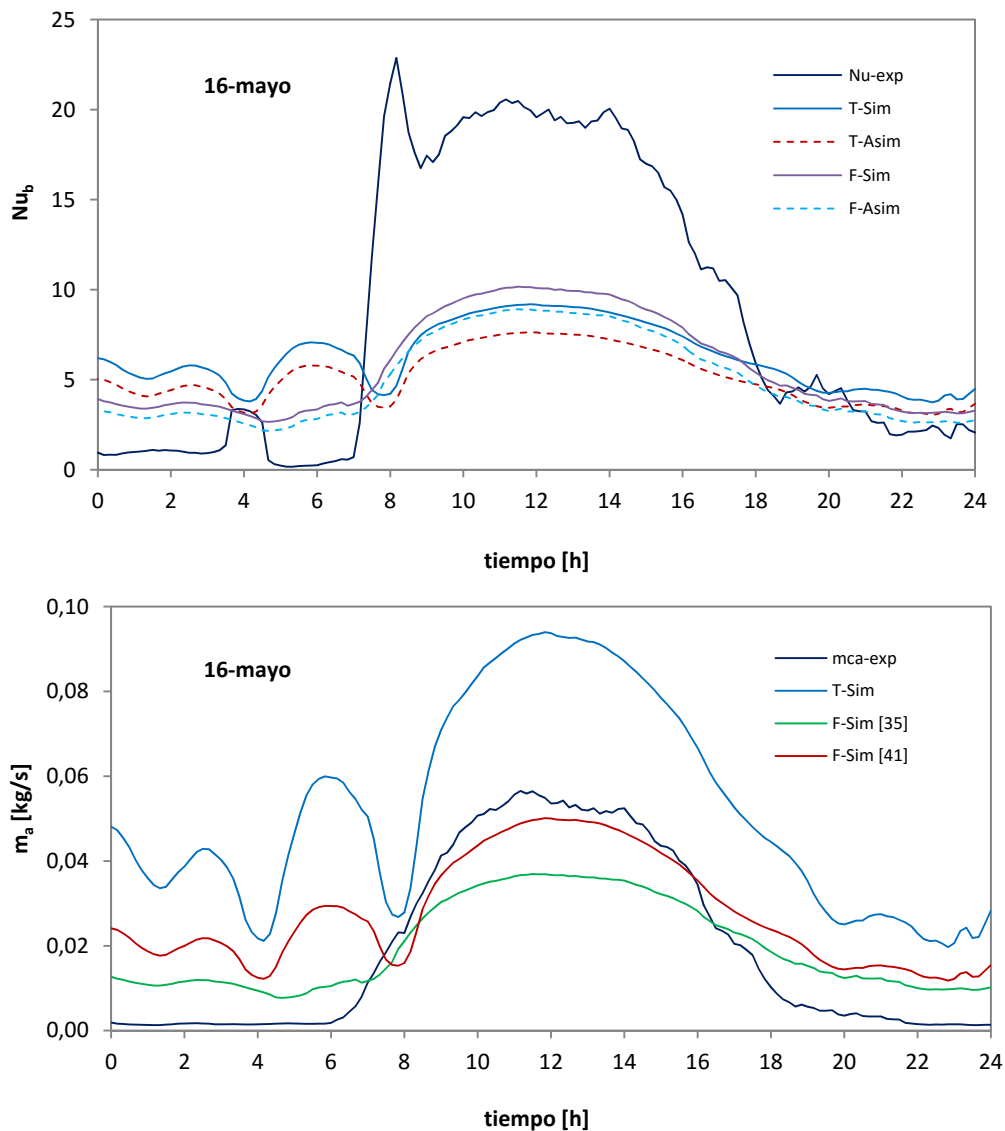


Figura 5.28 – Comparativa de los datos experimentales para el número de Nusselt, Nu_b , y el caudal de aire, m_{ca} , respecto a los modelos convencionales

En la Figura 5.28 se muestra la comparativa de los modelos presentados en el apartado 5.2.1 con los resultados experimentales. Se puede ver cómo los modelos estándar subestiman el coeficiente de convección, tanto para la hipótesis de temperatura constante como para la hipótesis de flujo constante. Una explicación de estas diferencias puede radicar en las características constructivas de la muestra. Los perfiles de montaje de la hoja exterior, que se sitúan en el interior de la cámara de aire, se comportan como aletas de disipación de calor, facilitando la transferencia entre las superficies que conforman la cámara ventilada y el aire que circula a través de la misma. En cuanto al caudal de aire circulante, el modelo de temperatura constante sobreestima en gran medida dicho caudal, ajustándose de mejor forma los modelos de flujo constante, pero cometiendo un error medio superior al $e_{ma} > 50\%$.

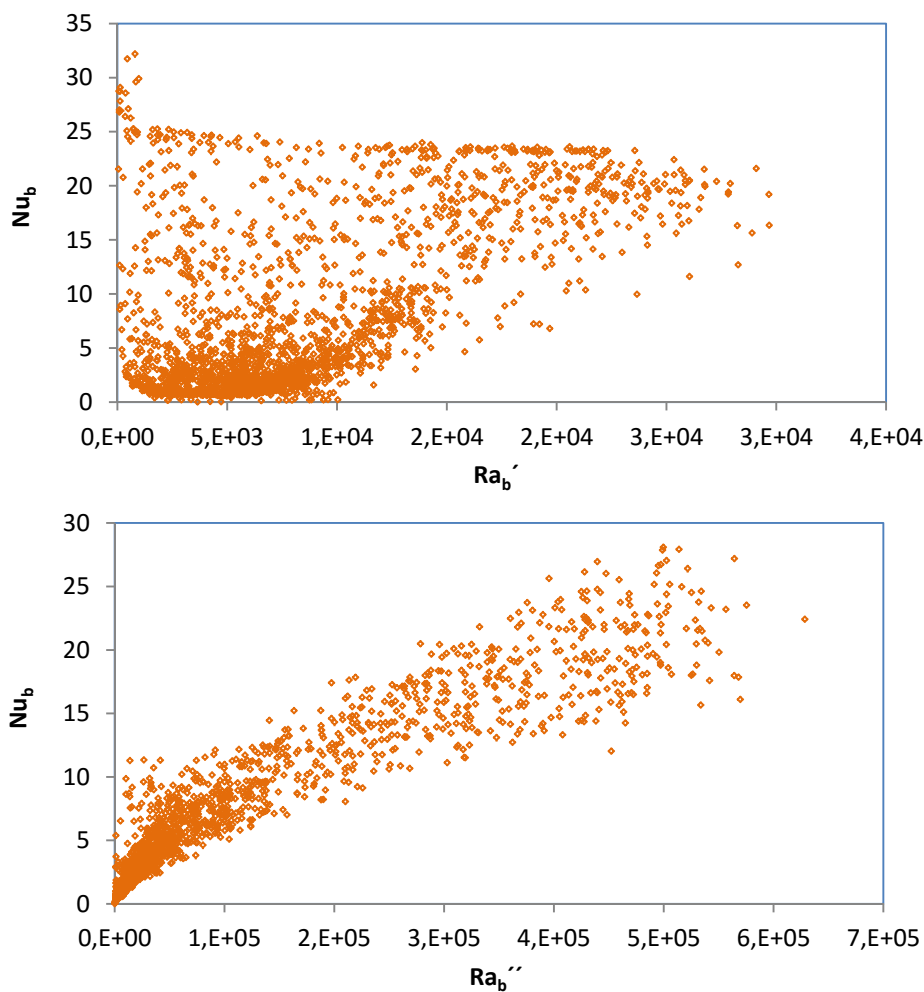


Figura 5.29 – Relación entre el número de Raileigh y el número de Nusselt para la hipótesis de temperatura constante, Ra_b' , y flujo de calor constante, Ra_b'' .

Por tanto, es necesario obtener un modelo experimental que se ajuste de forma más adecuada al comportamiento real de la fachada ventilada. En los modelos estándar de convección, el número de Nu_b es función del número de Ra_b . Si se grafica ambos coeficientes para cada instante de medida durante el periodo de ensayo se obtiene el resultado mostrado en la Figura 5.29. Se puede observar claramente que la hipótesis de temperatura constante no es válida para el caso real de la probeta. Sin embargo, la

hipótesis de flujo constante sí que presenta un patrón de correlación claro, además, con una forma potencial, como era de esperar.

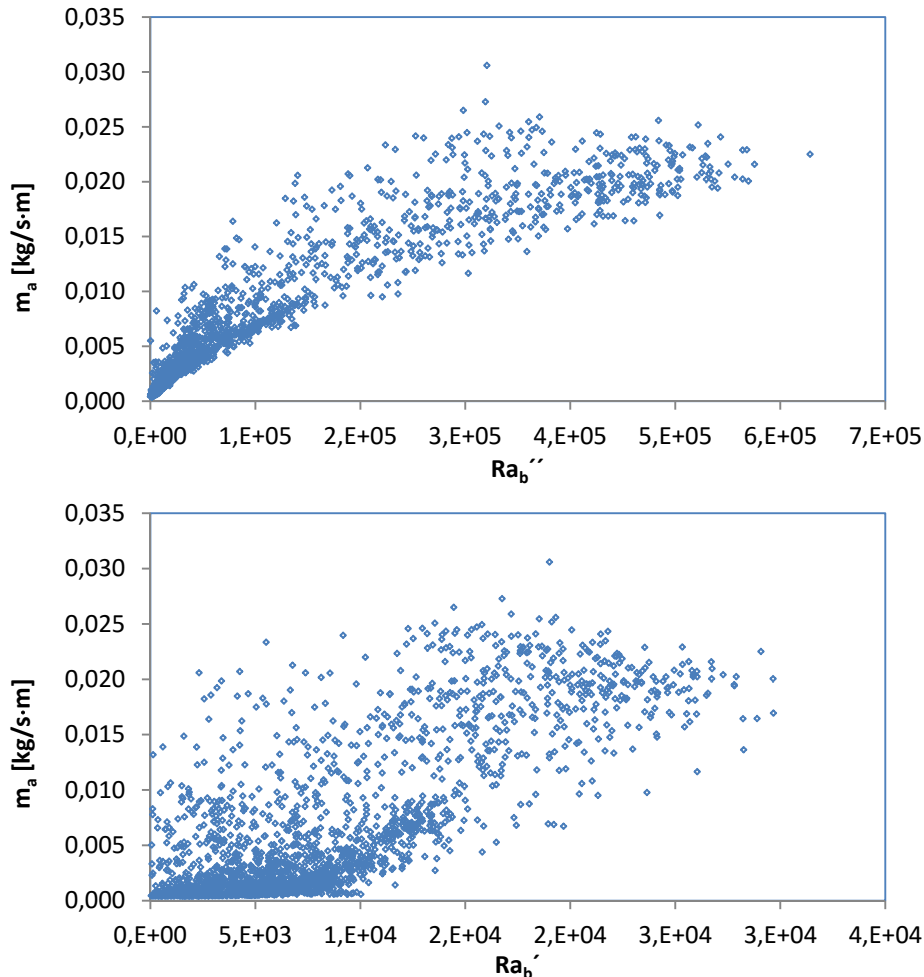


Figura 5.30 – Relación entre el número de Raileigh y el caudal de aire, m_a , para la hipótesis de temperatura constante, Ra_b' , y flujo de calor constante, Ra_b''

Si además, se analiza la relación entre el número de Ra_b y el caudal circulante en la cámara ventilada, para ambas hipótesis, ver Figura 5.30, se obtiene el mismo comportamiento. Por tanto, está claro que el modelo experimental a definir debe basarse en la hipótesis de flujo superficial constante. Pero antes, es necesario entender por qué se dan estos resultados, cuando usualmente se suele emplear con mayor frecuencia la hipótesis de temperatura constante.

En la Figura 5.31 se estudian los saltos de temperatura que se generan a lo largo del día de referencia que se ha seleccionado anteriormente. Se puede observar cómo el salto de temperaturas entre la media de las superficies y el aire exterior, $T_w - T_{ext}$, evoluciona entre el salto de temperaturas de la cara del aislante, $T_5 - T_{ext}$, y entre el salto de temperaturas de la hoja exterior, $T_6 - T_{ext}$. Durante las horas de radiación solar es la superficie exterior la que presenta mayores temperaturas y durante el resto de tiempo es la superficie de aislante. Sin embargo, en todo momento el salto de temperaturas entre la salida del aire de la cámara ventilada y la temperatura del aire exterior, $T_{sal} - T_{ext}$, es siempre mayor que el mayor salto de temperaturas de cualquiera de la superficie más caliente. Esto se debe a que el gradiente de temperaturas, respecto a la altura, en

las superficies de la cámara ventilada es suficientemente elevado como para que no sea aplicable la hipótesis de temperatura constante.

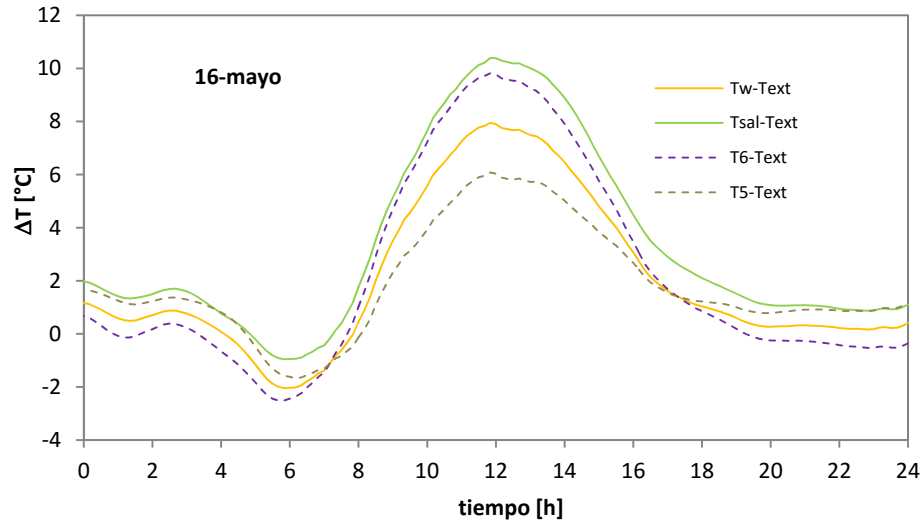


Figura 5.31 – Evolución del salto de temperatura del aire entre la entrada y salida de la cámara ventilada respecto al salto de temperaturas entre las superficies

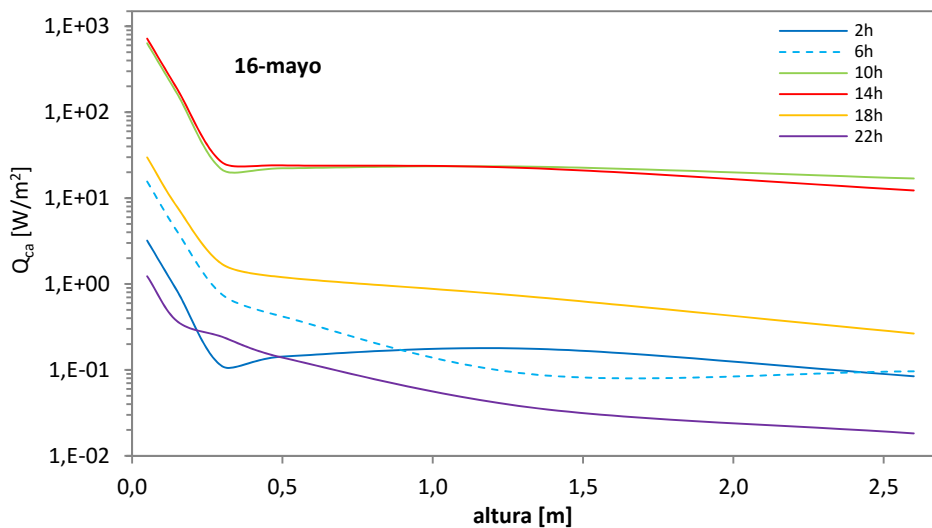


Figura 5.32 – Evolución del flujo de calor intercambiado en la cámara ventilada en función de la altura para diferentes instantes de tiempo

En cambio, si se analiza el flujo de calor intercambiado por unidad de superficie, se observa que el comportamiento se aproxima a la hipótesis de flujo constante. En la Figura 5.32 se muestran los perfiles de flujo de calor en función de la altura para diferentes instantes de tiempo del día de referencia. Se observa cómo el flujo a lo largo de la muestra es prácticamente constante, salvo en la zona de entrada de la cámara ventilada, donde se produce un intercambio mayor debido a las turbulencias en dicha zona, como se puede ver en los resultados del modelo de CFD, mostrados en el apartado 5.2.3. En la Figura 5.32 el perfil de flujo de calor correspondiente a las 6h, está en línea discontinua, ya que en este instante el aire de la cámara ventilada es el que cede calor a las superficies de la muestra.

$$Nu_b = \left[(Nu_{fd})^{1,4 \cdot n} + (Nu_p)^{1,05 \cdot n} \right]^n$$

$$Nu_{fd} = \frac{(Ra_b'')^{0,637}}{212}$$

$$Nu_p = 0,94 \cdot (Ra_b'')^f$$

$$f = -0,64 + 0,75 \cdot (Ra_b'')^{1/85}$$

$$n = 1,5$$
[5.49]

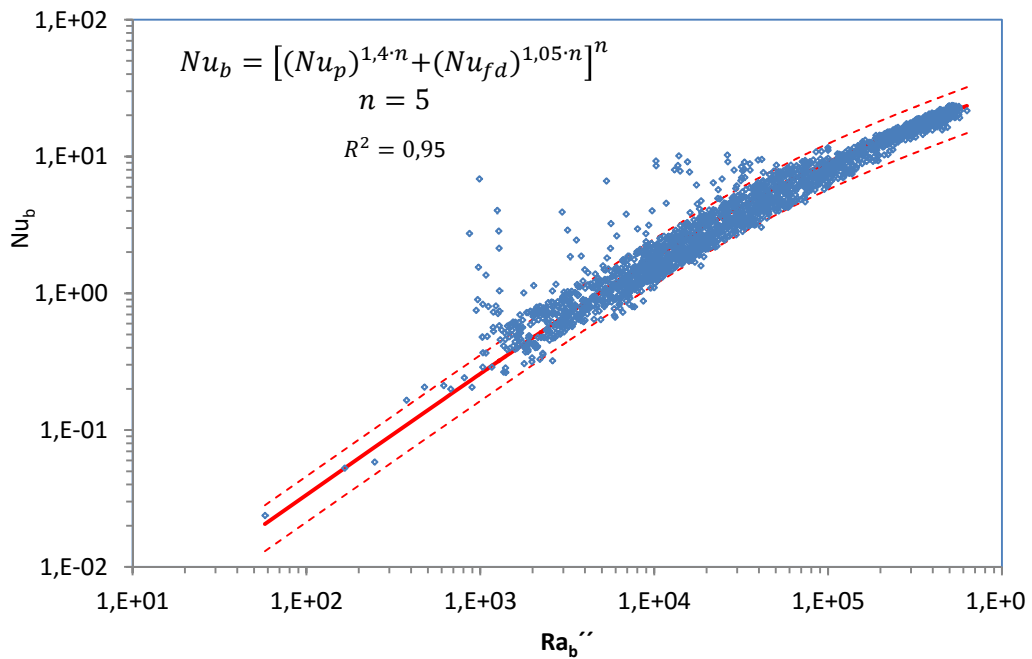


Figura 5.33 – Modelo experimental de convección en la probeta de ensayo de fachada ventilada ligera

Es decir, se produce una inversión del sentido de movimiento del aire de la cámara ventilada. Una vez seleccionada la hipótesis de flujo constante como la más válida, se pasa a obtener las expresiones que permitan determinar el coeficiente de convección y el caudal circulante en la cámara ventilada. Para el Nu_b se obtiene la relación mostrada en la ecuación [5.49], que presenta un error medio de estimación de $e_{Nu_b} = 9,2\%$. Este error es inferior a la incertidumbre de medida del ensayo, $u_{Nu_b} = 15,2\%$, recogida en la Tabla 5.1. Por lo que la precisión de ajuste se puede considerar como válida. En la Figura 5.33 se muestra la precisión de ajuste del modelo de convección a los datos experimentales, junto con las bandas de error de estimación.

En el caso del caudal circulante por la fachada ventilada, se ha obtenido un modelo que relaciona directamente dicho caudal con Ra_b'' . Esto simplifica su aplicación en herramientas de cálculo a escala de edificio, ya que se evita la necesidad de resolver el sistema de ecuaciones implícitas de los modelos estándar. El modelo final obtenido se muestra en la ecuación [5.50], donde el caudal se expresa por unidad de longitud de sección de fachada, m_a [kg/s·m]. El modelo presenta un error medio de estimación de $e_{m_a} = 5,4\%$. Este error es del mismo orden que la incertidumbre de medida del caudal realizada durante el ensayo, $u_{m_a} = 5,6\%$. Por tanto, también se puede considerar como

válida la bondad del ajuste obtenida. En la Figura 5.34 se muestra la precisión de ajuste del modelo del caudal a los datos experimentales junto con las bandas de error de estimación.

$$m_a = 0,081 \cdot (Ra_b'')^f \quad [5.50]$$

$$f = -7,55 \cdot (Ra_b'')^{-0,327}$$

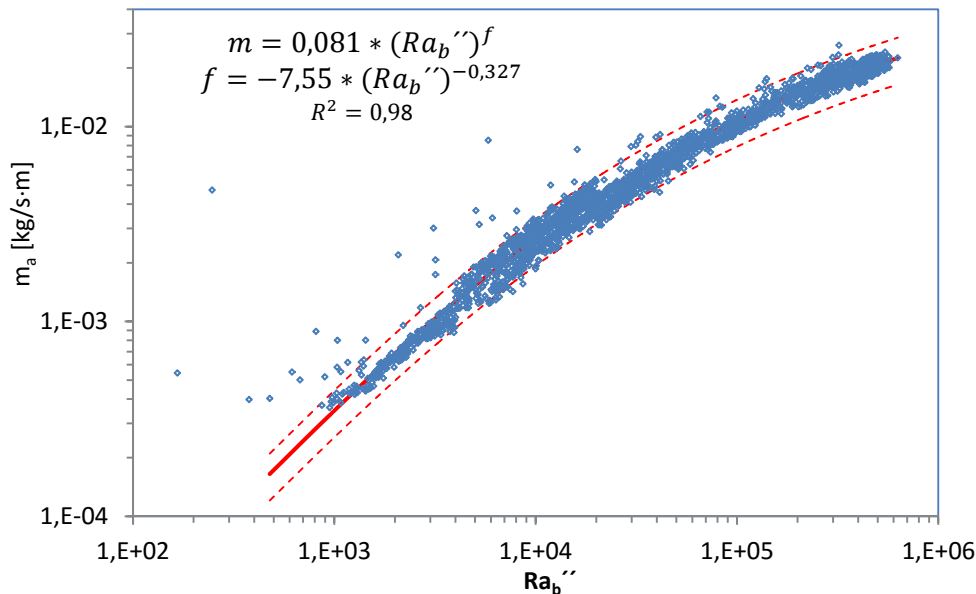


Figura 5.34 – Modelo experimental caudal de aire circulante en la probeta de fachada ventilada ligera

En el proceso de ajuste de los modelos se han eliminado los datos experimentales afectados por el viento exterior. Para ello no se han incluido en el proceso de ajuste los instantes de tiempo en los que la velocidad de viento fuese superior a $v_{ext} > 6$ [m/s]. Estos puntos eliminados representan un porcentaje inferior al 15% del total del periodo de ensayo. Para poder ver con mayor claridad la validez del modelo de convección experimental obtenido, en la Figura 5.35 se muestra los valores de Nu_b y m_a experimentales y los valores estimados respecto al eje de tiempo. Se puede observar el buen comportamiento del modelo, salvo en los periodos de efecto exterior del viento. Para ver con más detalle el ajuste del modelo, en la Figura 5.36 se muestra la comparativa para el día de referencia seleccionado anteriormente, en el cual el efecto del viento exterior es despreciable. Para finalizar la validación del modelo de convección, se compara con los datos experimentales del segundo periodo de ensayo realizado en la celda PASLINK. Los datos de dicho ensayo se recogen con más detalle en el Anexo C. En la Figura 5.37 se muestra los resultados del comportamiento del modelo para el número Nu_b y para el caudal de aire, m_a . Los errores medios que se obtienen en la estimación es de $e_{Nub} = 6,6\%$ y $e_{ma} = 2,6\%$. Ambos se encuentran dentro del rango de incertidumbre determinado anteriormente. En el cálculo de error se han eliminado los instantes de tiempo en los que la velocidad de viento exterior es elevada, con el mismo criterio que el empleado en el desarrollo del modelo. El efecto del viento en el periodo de contraste representa un 19,3% del total de puntos. Para ver con más detalle la precisión del modelo se muestra un día tipo, en este caso el correspondiente al 1 de junio, ver Figura 5.38. Una vez estudiado el proceso de convección respecto al comportamiento del aire dentro de la cámara ventilada, el siguiente paso es

discriminar el reparto de cargas térmicas entre cada una de la superficies que conforman la fachada. De esta forma, se puede determinar con mayor precisión el efecto del comportamiento activo en la demanda de un edificio. Para llevar a cabo este análisis se aplica un modelo de identificación de parámetros.

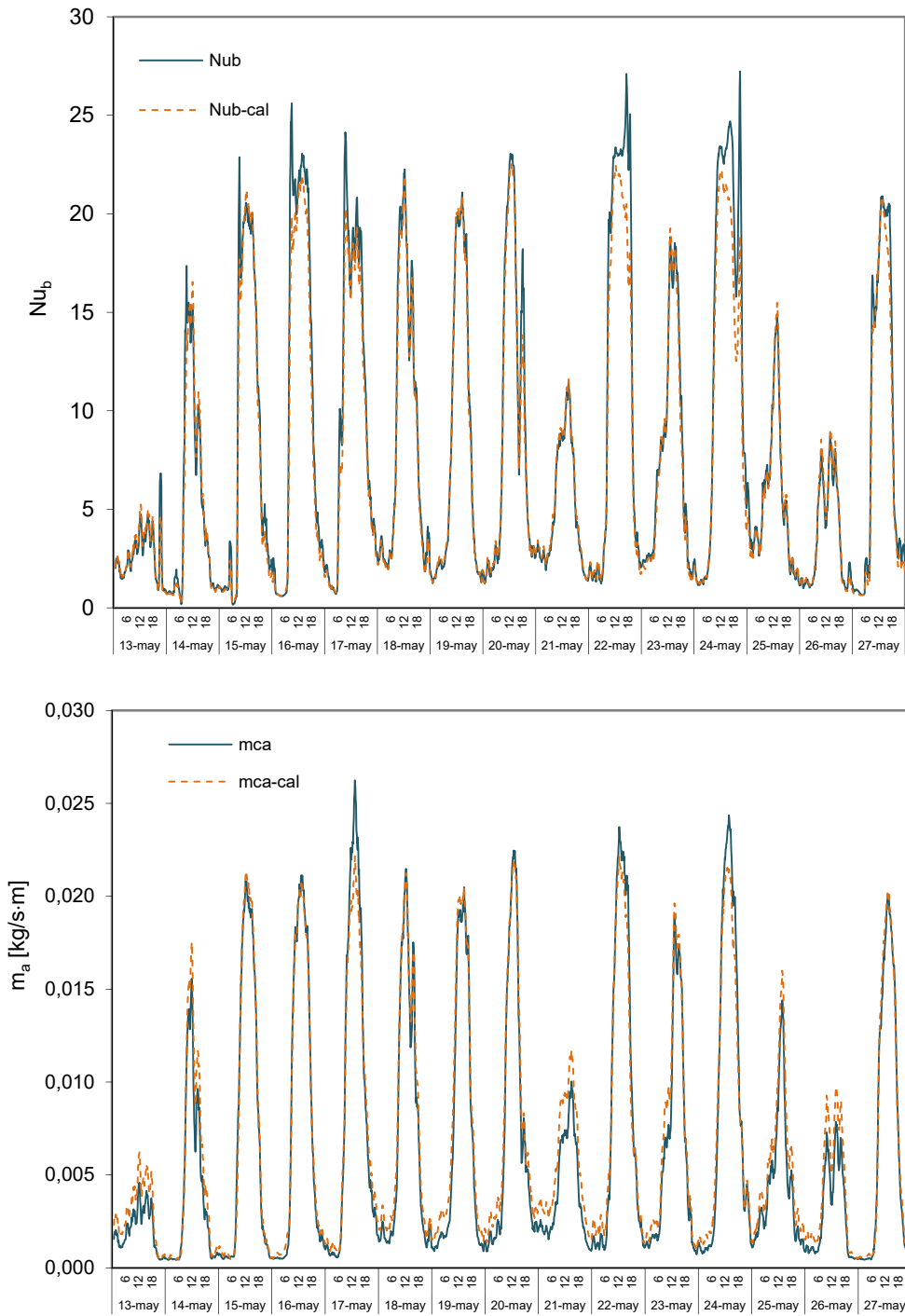


Figura 5.35 – Comparativa entre los datos experimentales y el modelo para el periodo de ensayo

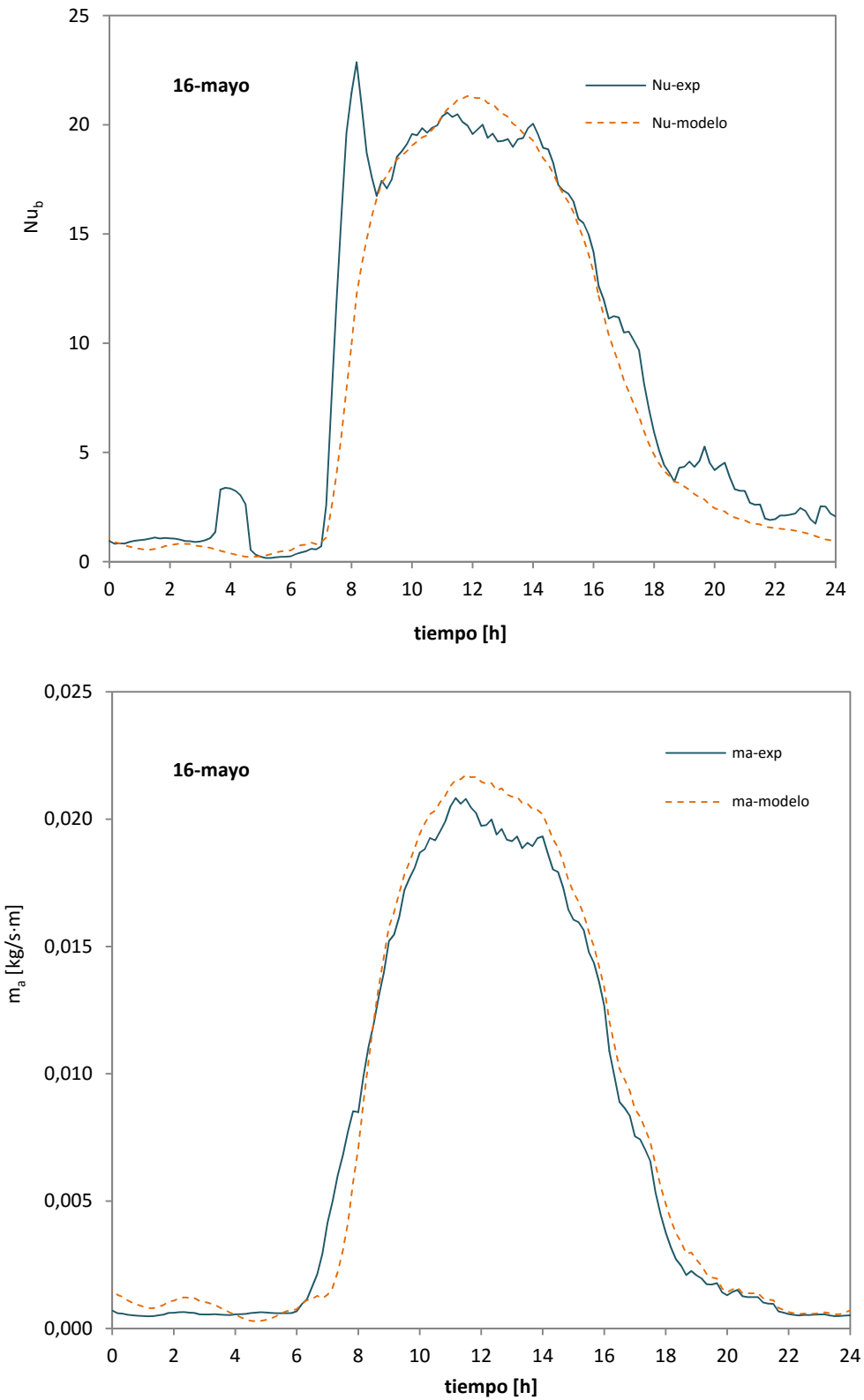


Figura 5.36 – Comparativa entre los datos experimentales y el modelo para el día de referencia

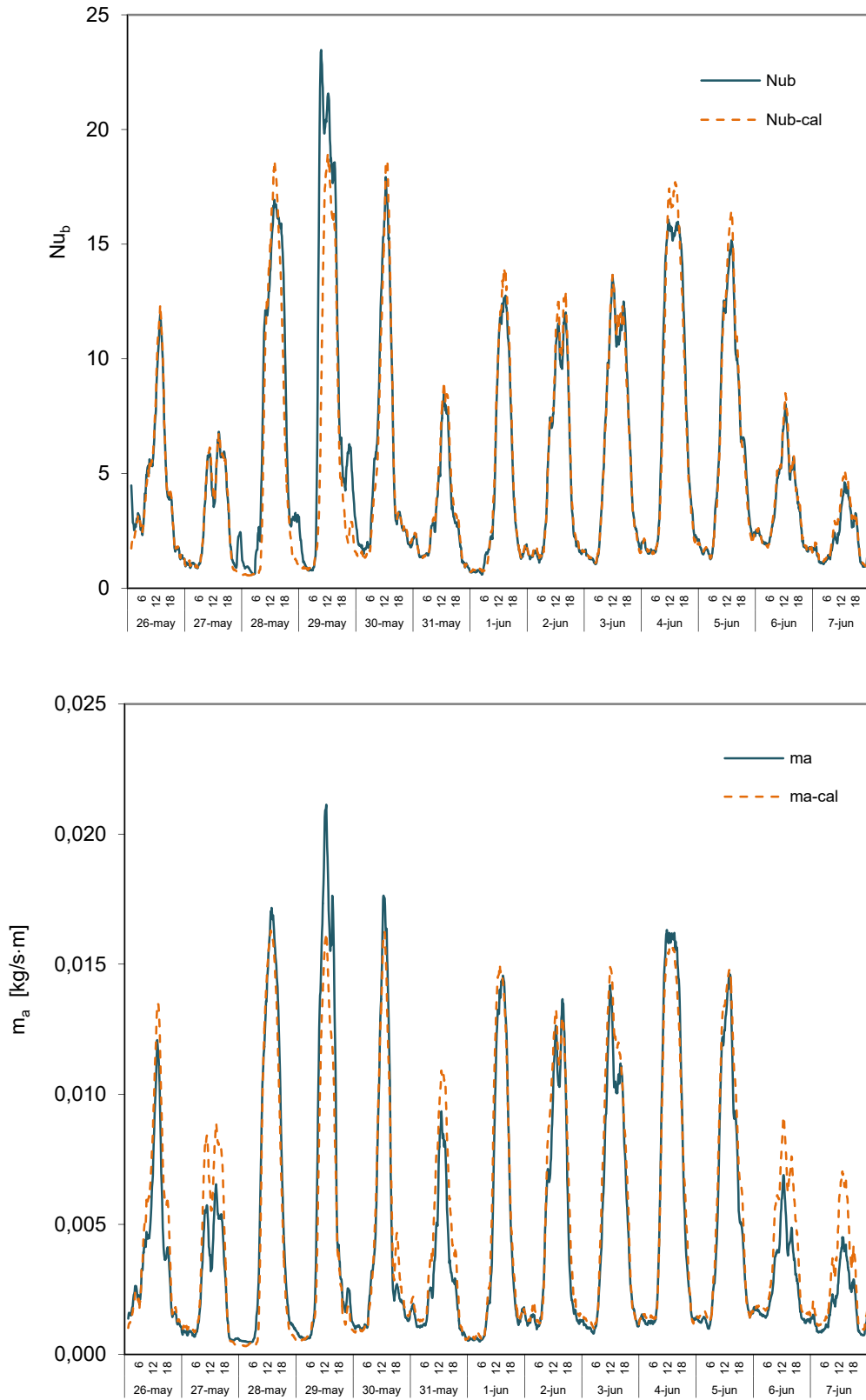


Figura 5.37 – Comparativa entre los datos experimentales y el modelo para el periodo de contraste

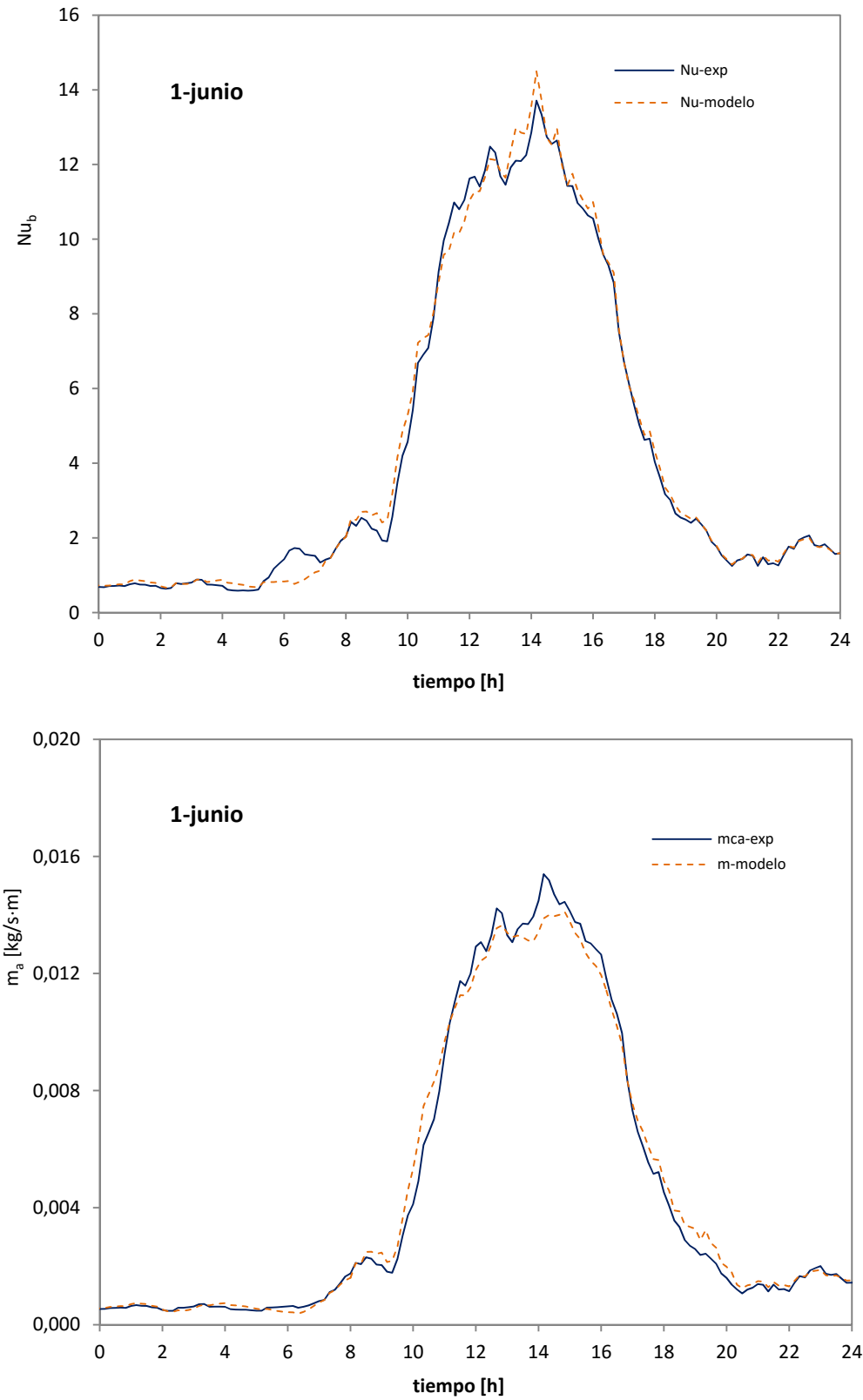


Figura 5.38 – Comparativa entre los datos experimentales de contraste y el modelo para el día 1 de junio

5.2.3.2 Modelo de parámetros concentrados

Para representar el comportamiento de la cámara ventilada, al modelo del muro base con aislamiento, definido en la Figura 5.6, se le añaden las transmitancias de la cámara de aire y de la hoja exterior de cemento, como se muestra en la Figura 5.39. La cámara de aire está representada entre los nodos 5 y 6, manteniendo la nomenclatura de las capas en la probeta de ensayo, ver Figura 4.8. Como datos de temperatura se emplean los valores medios de cada una de las capas. Se aplica esta aproximación ya que el modelo posterior a escala de edificio definido en *TRNSYS*, trabaja con valores medios en cada uno de los paños definidos en las fachadas, tanto para las superficies como para el aire de la cámara ventilada. Por tanto, el modelo de parámetros concentrados tiene que representar esta condición.

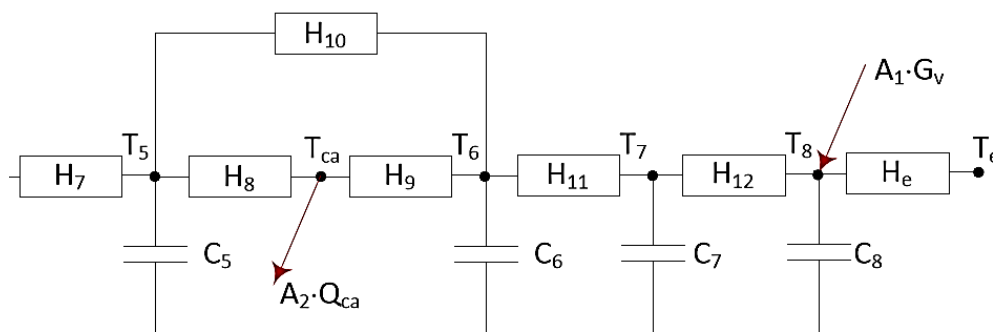


Figura 5.39 – Modelo de celda para el muro base con la fachada ventilada ligera

En cuanto al proceso de transmisión de calor en la cámara ventilada, la convección entre ambas superficies y el aire se modela mediante dos conductancias, H_8 y H_9 . Y el intercambio de calor por radiación entre superficies se modela mediante la conductancia H_{10} . Las conductancias de convección se asocian a la velocidad en la cámara de aire mediante una expresión lineal, [5.51]. Esta aproximación se toma como válida a partir de los resultados experimentales obtenidos.

$$H_i = a_i + b_i \cdot v_{ca} \quad i = 10,11 \quad [5.51]$$

Si se compara el coeficiente de convección medio del aire en la cámara ventilada respecto a la velocidad eficiente en el punto situado a la altura media de la probeta, se obtiene el resultado mostrado en la Figura 5.40. Por tanto, se considera que la aproximación lineal es aplicable también para el proceso de convección en cada una de las superficies de la cámara ventilada. Esta hipótesis se valida también con el análisis de los residuos de las variables objetivo del modelo. En cuanto al mecanismo de transmisión de calor por radiación, si se considera válida la hipótesis de superficies paralelas semi-infinitas, el flujo de calor por unidad de superficie intercambiado entre las capas 5 y 6 de la muestra de ensayo, q_{rad56} , se obtiene mediante la expresión [5.52].

$$q_{rad56} = \frac{\sigma(T_6^4 - T_5^4)}{\frac{1}{\epsilon_6} + \frac{1}{\epsilon_5} - 1} \quad [W/m^2] \quad [5.52]$$

Para poder introducir en el modelo de parámetros concentrados el intercambio radiativo, la diferencia de potencias a la cuarta de las temperaturas superficiales se

puede expresar, mediante el desarrollo en serie, como se muestra en la ecuación [5.53]. Donde el término T_m corresponde a la temperatura media de ambas superficies, definida en la ecuación [5.47], expresada en unidades de grados Kelvin. El error que se comete con esta aproximación, en el rango de temperaturas de trabajo, es inferior al $e < 0,01\%$.

$$(T_6^4 - T_5^4) \cong 4 \cdot T_m^3 \cdot (T_6 - T_5) \quad [5.53]$$

$$e = \frac{2 \cdot (T_6 - T_5)}{T_m^2} < 0,01\%$$

Si además, se considera que las emisividades de ambas superficies, para el espectro infrarrojo, son similares, el intercambio de calor por radiación se puede expresar según [5.54].

$$Q_{rad56} = H_{rad56} \cdot (T_6 - T_5)$$

$$H_{10-12} = H_{rad56} = P_0 \cdot \frac{4 \cdot \sigma \cdot S \cdot T_m^3}{\frac{2}{\epsilon} - 1} \quad [5.54]$$

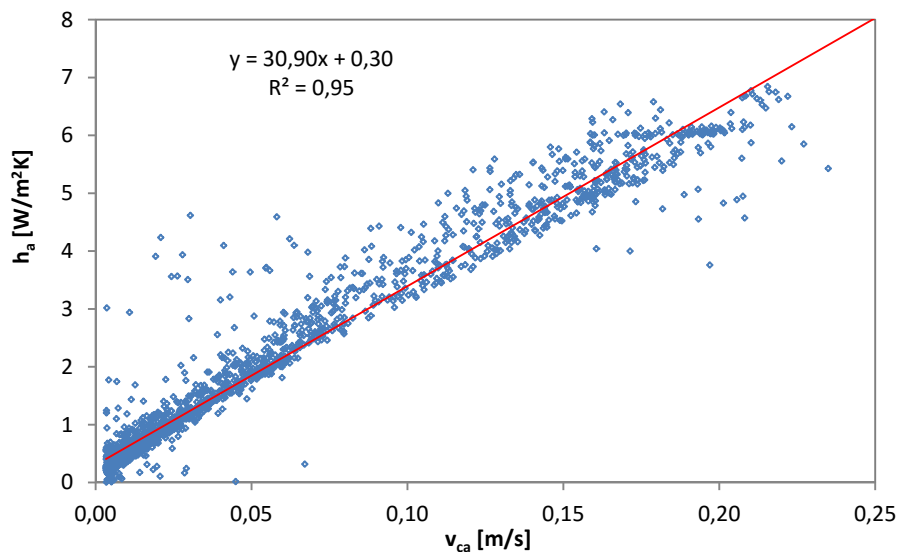


Figura 5.40 – Validación de la aproximación lineal entre el coeficiente de convección, h_a , y la velocidad del aire, v_{ca} , en la cámara ventilada

La conductancia de radiación, H_{rad56} , se calcula para cada instante del ensayo tomando como base una emisividad de $\epsilon = 0,8$, y se corrige con un término P_0 , que se define como una variable más de ajuste en el proceso de identificación. En la Tabla 5.12 se recogen los resultados obtenidos en el modelo para la cámara de aire ventilada, junto con su incertidumbre. El resto de resultados y la validación del modelo se muestran con más detalle en el Anexo D. A continuación se analizan los resultados que se han obtenido para la parte de la cámara ventilada de la muestra. En lo referente a la capa de aislamiento, la resistencia térmica del aislante formado por lana de roca, R_{LR} , presenta una disminución del 11,7% respecto al sistema SATE directo estudiado en el apartado 5.1.2. Esta reducción se debe a los puentes térmicos del sistema de anclaje de la perfilaría que sirve de sujeción de las placas de cemento exteriores. Aunque el

sistema de montaje está diseñado para minimizar estos puentes térmicos, se puede apreciar cómo sus efectos siguen existiendo y representan una reducción de la eficiencia del aislamiento, a tener en cuenta en todo proyecto que emplee soluciones de envolvente en base a fachadas ventiladas.

	<i>parámetro</i>	<i>valor</i>	<i>unidades</i>	<i>u_i [%]</i>
<i>aislante</i>	R_{LR}	1,132	m^2K/W	3,1
	h_{c5}	$1,81+131,46 \cdot v_{ca}$	W/m^2K	13,5
<i>cámara</i>	h_{c6}	$3,92+108,54 \cdot v_{ca}$	W/m^2K	5,7
	<i>aire</i>	$P_0(H_{rad56})$	-	14,4
	$A(Q_{ca})$	1,067	-	5,4
<i>placa</i>	R_{p-c}	0,059	m^2K/W	12,1
<i>cemento</i>	C_{p-c}	0,023	MJ/m^2K	22,3
<i>exterior</i>	h_{ext}	24,52	W/m^2K	9,8
	$A(G_v)$	0,821	-	8,7

Tabla 5.12 – Resultados del modelo de parámetros concentrados de la cámara de aire de la fachada ventilada ligera

En cuanto a los parámetros de la cámara de aire, en la Figura 5.41 se muestra, como ejemplo, la evolución de los coeficientes de convección de cada una de las superficies para el día tipo de referencia. Los valores mínimos de dicho coeficiente son de $h_{c5-min} = 2,23 [W/m^2K]$ y $h_{c6-min} = 4,27 [W/m^2K]$. Según normativa y referencias internacionales^[52,53,87,141,320,354], el coeficiente de convección en cámaras estancas semi-infinitas es de $h_c = 1,25 [W/m^2K]$. Este valor sería el límite inferior de dicho coeficiente para la cámara ventilada, siendo casi el doble para la superficie del aislante, y más del triple para la superficie de la placa de cemento. A esta diferencia de valores del coeficiente de convección hay que sumar el sentido de movimiento del aire.

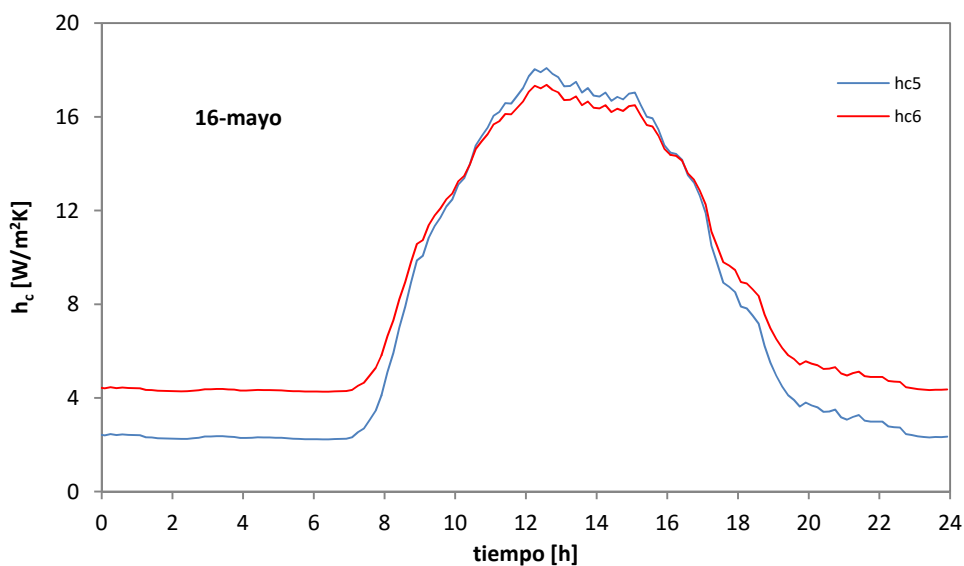


Figura 5.41 – Evolución de los coeficientes de convección en las dos superficies de la cámara ventilada para el día de referencia

En la superficie del aislante, el flujo es ascendente, ya que es la superficie la que presenta mayor temperatura que el aire, y sin embargo, en la proximidad a la placa de cemento el sentido de movimiento es descendente, ya que es el aire el que cede calor. Los valores máximos que se obtiene para la convección son de $h_{c5-max} = 19,50$ [W/m²K] y $h_{c6-max} = 18,53$ [W/m²K], próximos entre sí. En cuanto al intercambio de calor por radiación, la transmitancia H_{rad56} se obtenía tomando como referencia una emisividad media de las superficies que conforman la cámara de $\varepsilon = 0,8$. Aplicando el coeficiente de corrección obtenido en el modelo de parámetros concentrado, el resultado final de emisividad media entre superficies es de $\varepsilon = 0,84$. Por último, se ha introducido un factor de corrección del calor absorbido por la cámara de aire, A (Q_{ca}), que permite mejorar el ajuste del modelo, y que tiene en cuenta el error de medida de dicha variable. El resultado indica un flujo medio mayor al medido en un 6,7%, teniendo en cuenta que la incertidumbre de medida es del 6,6%, ver Tabala 5.11, el resultado es válido.

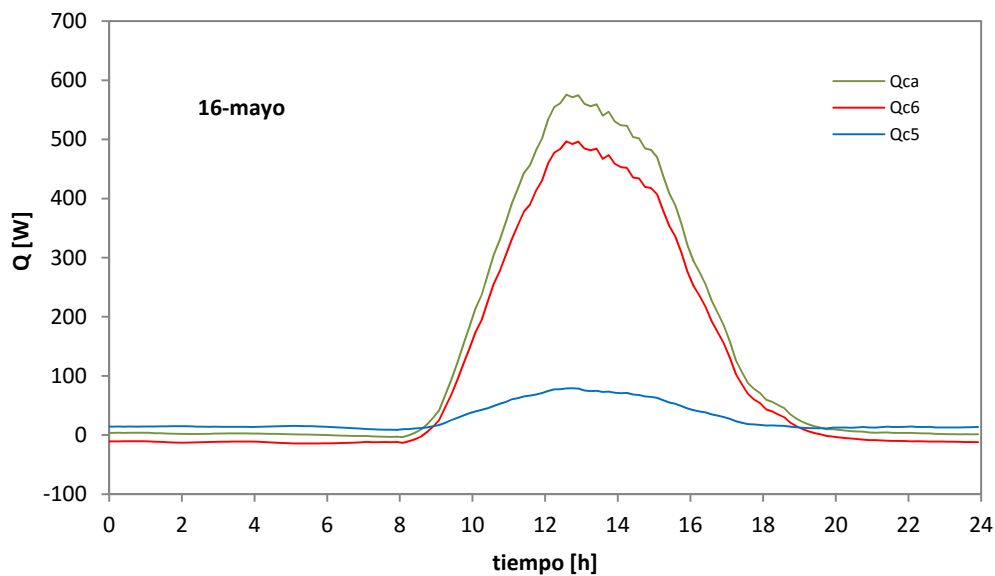


Figura 5.42 – Calor aportado al aire de la cámara ventilada por cada una de las superficies que la conforman

Una vez contrastado el modelo de la fachada ventilada, éste se puede aplicar para analizar el comportamiento térmico de la cámara ventilada y su repercusión en la demanda energética de las viviendas y en el posible aprovechamiento del calor de la cortina de aire. En la Figura 5.42 se muestra el reparto de calor aportado a la cámara de aire ventilada por cada una de las superficies que la configuran. Se ve claramente, que la superficie exterior, correspondiente a la hoja de cemento, se comporta como principal foco de calor, aportando un 84% del calor cedido a la cámara de aire. Por tanto, la superficie del aislante aporta el 16% restante. En la Figura 5.43 se muestra el reparto de flujos de calor para cada una de las superficies. Se toma como criterio de signos flujos positivos cuando son cedidos por la superficie, y flujos de calor negativos cuando están entrando en la superficie. La superficie 6, correspondiente a la hoja exterior de cemento, actúa como emisor entre las 8h y las 19.30h, el resto de tiempo recibe energía del aire y de la radiación de la superficie del aislante. En cuanto a los mecanismos de transferencia de calor, el 74,1% lo intercambia por convección con el aire y el 25,9% restante los intercambia por radiación. En la superficie 5, correspondiente al aislante, durante este mismo periodo de tiempo, el flujo de calor mayoritario es la radiación que recibe de la superficie de cemento. De esta energía incidente, el 74,4% la cede por convección al aire de la cámara ventilada, y el 25,6%

restante lo trasmite hacia el interior del muro por conducción. El resto del tiempo, durante el amanecer y el anochecer, la superficie del aislante es el principal foco de calor, cediendo por radiación a la superficie más fría del cemento el 65,8% de la energía que pierde y el restante 34,2% al aire mediante convección.

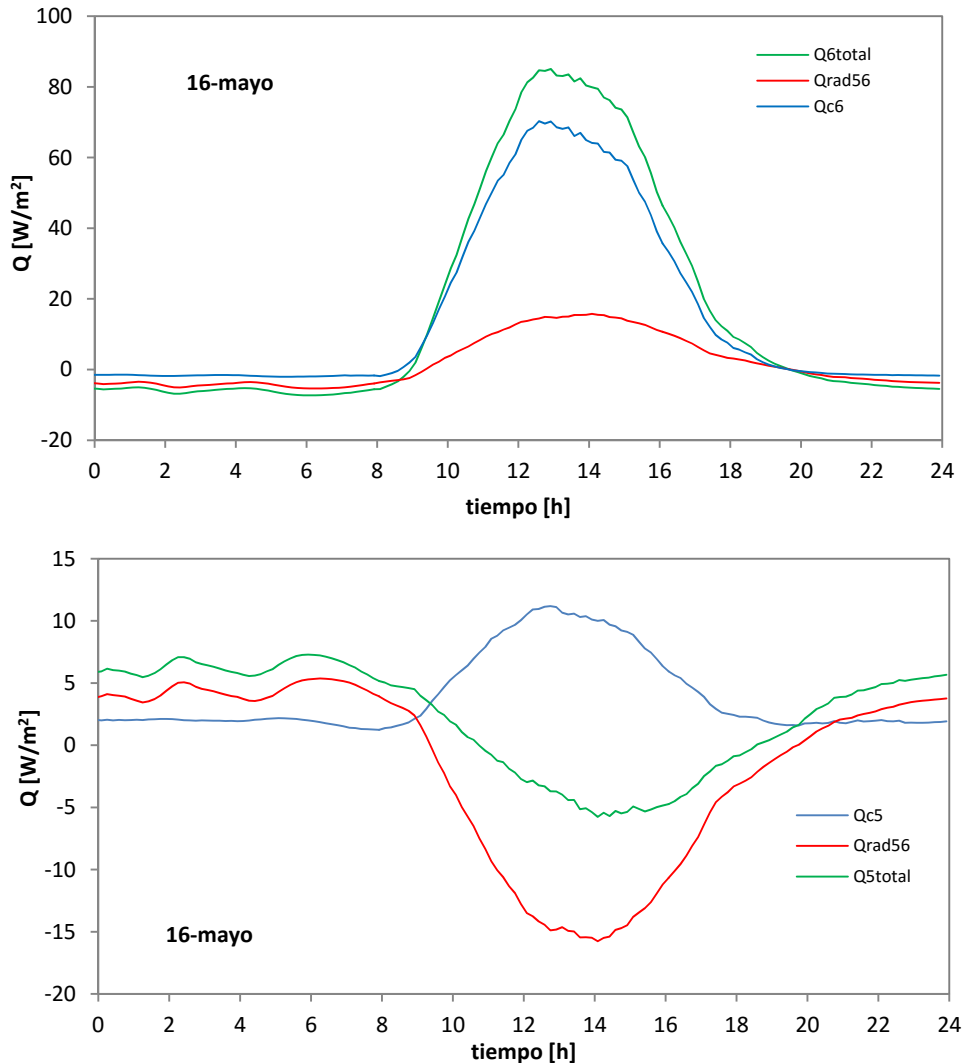


Figura 5.43 – Calor aportado al aire de la cámara ventilada por cada una de las superficies que la conforman

Queda por comparar los flujos calculados por el modelo con los flujos medidos mediante los fluxímetros instalados en la probeta, analizados en el apartado 4.2.2 del Capítulo 4. En la Figura 5.44 se muestra en azul los flujos de convección obtenidos por el modelo y en rojo los valores medidos. Se puede ver que el flujo se ajusta bien durante los periodos en los que no hay incidencia solar, pero se desvía durante las horas centrales del día. En el caso de la superficie de cemento el flujo medido es inferior al estimado por el modelo, y en la superficie del aislante se produce el efecto inverso, el flujo medido es superior al obtenido por el modelo. Este comportamiento parece indicar que el intercambio radiativo entre ambas superficies es el causante de las divergencias entre los valores calculados respecto a los valores medidos. Para comprobar este planteamiento en la *capa 6* se resta al flujo de convección el calor cedido por radiación, línea azul discontinua, y se obtiene que ambas curvas se solapan. En el caso de la *capa 5*, al flujo de convección se le suma el flujo de radiación, y se

obtienen los mismos resultados. Esto implica que el propio sensor de flujo de calor se está enfriando por radiación en la *capa 6* y por tanto mide un flujo inferior al real, y en el caso de la *capa 5* la radiación incidente sobrecalienta el sensor generando una señal aumentada del flujo convectivo medido. Por tanto, los sensores de flujo de calor empleados en el ensayo, miden una mezcla de mecanismos de transmisión de calor solapados, lo que implica que su utilización directa en la caracterización de muestras sea poco fiable, siempre que no se acompañen de un estudio completo a nivel de celda.

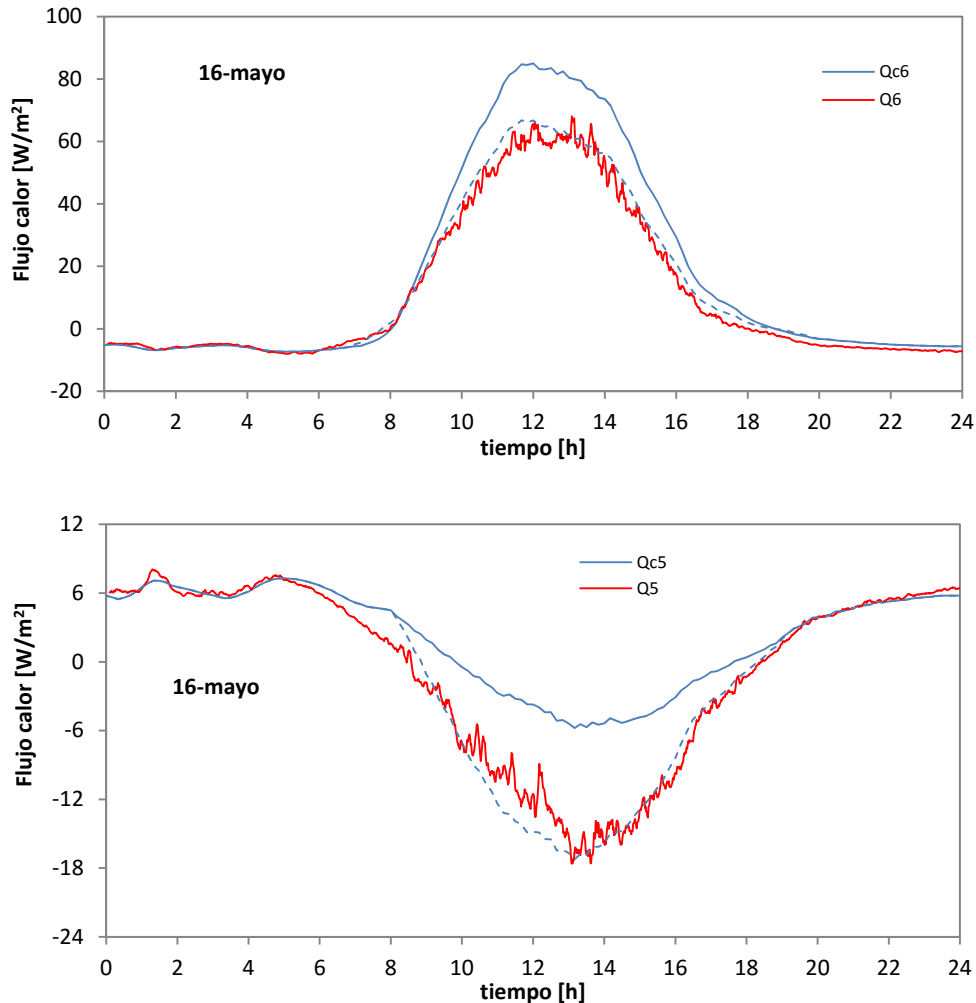


Figura 5.44 – Comparativa del modelo de cámara ventilada con los sensores de flujo instalados en la probeta de fachada ventilada ligera

En este caso han servido para verificar la validez del modelo de convección, que no sólo explica el proceso global de intercambio de calor en la cámara ventilada de la muestra, sino que además, explica con precisión todos los datos experimentales registrados. A la luz de los resultados obtenidos para los sensores de flujo de calor, y debido al reducido espacio disponibles en las cámaras ventiladas del resto de muestras de fachada ventilada, se decide no incluirlos entre la instrumentación óptima para la caracterización experimental de las probetas en el ensayo. Tras el análisis de los resultados obtenidos del comportamiento térmico de la fachada ventilada ligera, se puede concluir que se trata de una solución de envolvente con efecto refrigerante. Si se compara el flujo de calor total en la superficie del aislante, el 54,4% del calor intercambiado es de pérdidas y el, 45,6% restante es de ganancias. Por tanto, más de la

mitad del día tipo la fachada está cediendo calor, siendo un día con temperaturas exteriores no muy bajas y con una incidencia solar importante. Pero por otro lado, el calor absorbido por la cámara de aire se transforma en una energía con un potencial de aprovechamiento nuevo, ya que al disponer de un fluido caloportador, esta energía se puede redireccionar a los sistemas de climatización del edificio. En el día tipo, la cámara de aire recoge un 16,6% de la energía solar incidente, ver Figura 5.45, y en el periodo de ensayo la media de dicha eficiencia de captación es del 11%. No es una eficiencia muy alta, pero es una potencia que aporta la fachada sin encarecer de ninguna forma el coste constructivo. De ahí el potencial de aprovechamiento de un calor que en principio no se tiene en cuenta en ningún aspecto de diseño del edificio.

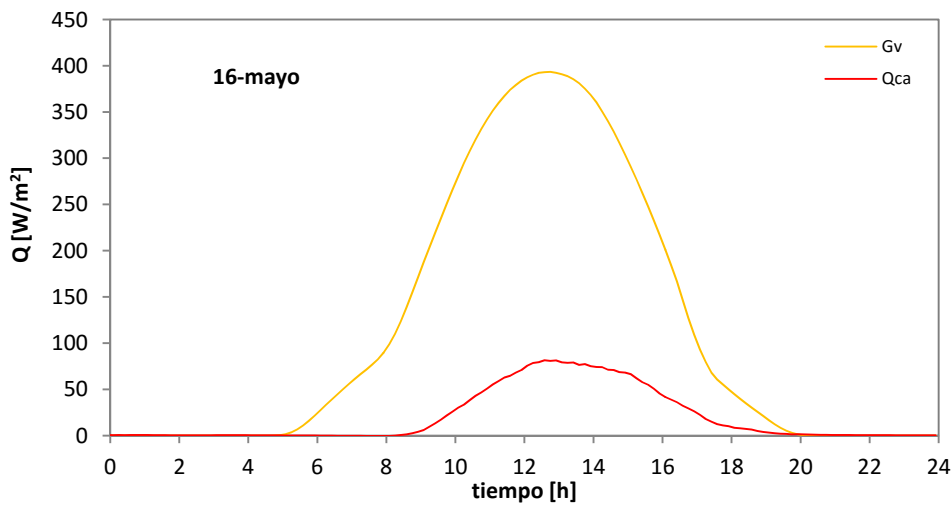
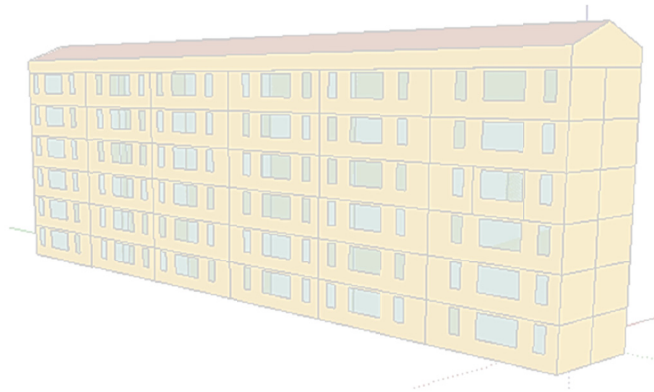


Figura 5.45 – Calor absorbido por la cortina de aire respecto a la radiación solar incidente sobre la fachada ventilada ligera

Toda la valoración energética realizada anteriormente se restringe a una superficie de envolvente reducida, la propia de la muestra ensayada en la celda PASLNIK. Falta dar el paso a escala de edificio y ver las potencialidades reales y estimar el comportamiento energético de estas soluciones de fachadas activas. Este paso se puede dar gracias a los modelos de la cámara de aire desarrollados en este apartado y que se implementan en la herramienta de simulación energética de edificios TRNSYS que se desarrolla en el siguiente capítulo del presente trabajo.

Capítulo 6

Modelo a escala de vivienda





6.1 Modelo del edificio

En el presente capítulo se finaliza el trabajo alcanzando el objetivo final de trasladar los resultados del modelo de fachada ventilada obtenido a través de datos del ensayo en la celda *PASLINK*, a la escala de edificio. Para ello, se emplea la herramienta de cálculo *TRNSYS*, software de referencia internacional en el análisis de los mecanismos físicos de transmisión de calor en edificación. El estudio se aplica a un edificio de referencia empleado en trabajos previos del grupo *ENEDI*^[129,328]. Se trata de una tipología de edificio muy representativa de las soluciones constructivas durante el periodo del desarrollismo constructivo que va de la década de los 50 a los 90, en el Pas Vasco. En el *apartado 6.1* se definen las características del modelo de edificio, tanto para las condiciones originales como con el estado final rehabilitado, tras modificar la envolvente empleando el sistema de fachada ventilada ligera. Posteriormente, en el *apartado 6.2* se analizan los resultados del modelo, comparando las demandas del edificio inicial respecto a las obtenidas tras aplicar los dos sistemas de aislamiento analizados en los ensayos, *SATE* y fachada ventilada. Las demandas del edificio base permiten obtener una imagen representativa del comportamiento térmico del parque edificatorio sin rehabilitar y la potencialidad de ahorro energético si se actúa adecuadamente sobre el mismo. Los resultados obtenidos de los modelos de edificio rehabilitado permiten obtener información sobre el alcance final de las obras de aislamiento térmico en la reducción de consumos de energía en el sector de la edificación y la potencialidad de aplicación de los sistemas de fachada ventilada.

6.1.1 Características constructivas

El edificio seleccionado para el estudio consiste en un bloque real de viviendas, construido en 1960, con una configuración de planta rectangular, con una anchura de 53 [m] y un fondo de 7 [m] aproximadamente, y una superficie construida por planta alrededor de 371 [m²]. Dispone de planta baja para viviendas, otras cinco plantas de viviendas y planta bajo cubierta. Se trata de una tipología y una construcción habitual en edificación residencial en las ciudades de España que en torno a mediados de *siglo XX* vivieron la nueva revolución industrial y el consiguiente incremento de población. En la Figura 6.1 se muestran imágenes del entorno donde se ubica el edificio, fotografía superior, y de la fachada sur del edificio descrito, fotografía inferior. La distribución de las viviendas se estructura en tres núcleos de escaleras con dos viviendas por planta en cada núcleo, sumando un total de 36 viviendas. Las viviendas son pasantes, con tres habitaciones que dan a la fachada oeste y con salón, cocina y baño que dan a la fachada este. En la Figura 6.2 se muestra una imagen con mayor detalle del alzado de la fachada este, y el plano de planta con distribución de las viviendas y los núcleos comunes de escalera.

En cuanto a la cubierta, ésta se conforma a dos aguas, con los faldones desaguando cada uno hacia una de las fachadas principales, este y oeste. En la Figura 6.3 se muestra el modelo final del edificio definido para el cálculo en *TRNSYS* a través de la plataforma *SketchUp*. Aprovechando la configuración de estancias se definen dos zonas térmicas por vivienda, una que engloba los dormitorios y otra que engloba la cocina, salón y baños. Esta configuración permite, a su vez, discriminar los diferentes patrones de uso día-noche, y el aprovechamiento solar por las distintas orientaciones, de forma que se puede determinar con mayor precisión las demandas energéticas reales del edificio. Las zonas comunes de escalera se definen como zonas térmicas aparte, ya que presentan condiciones de uso diferentes.



Figura 6.1 – Edificio seleccionado para el estudio de demandas, detalle de la ubicación, superior, y detalle de la fachada este, inferior

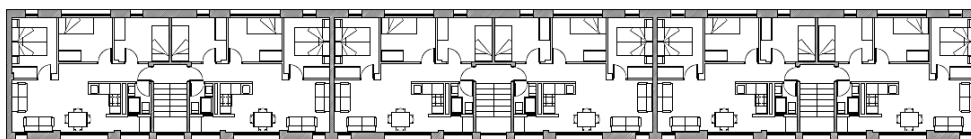


Figura 6.2 – Distribución de las viviendas en el edificio

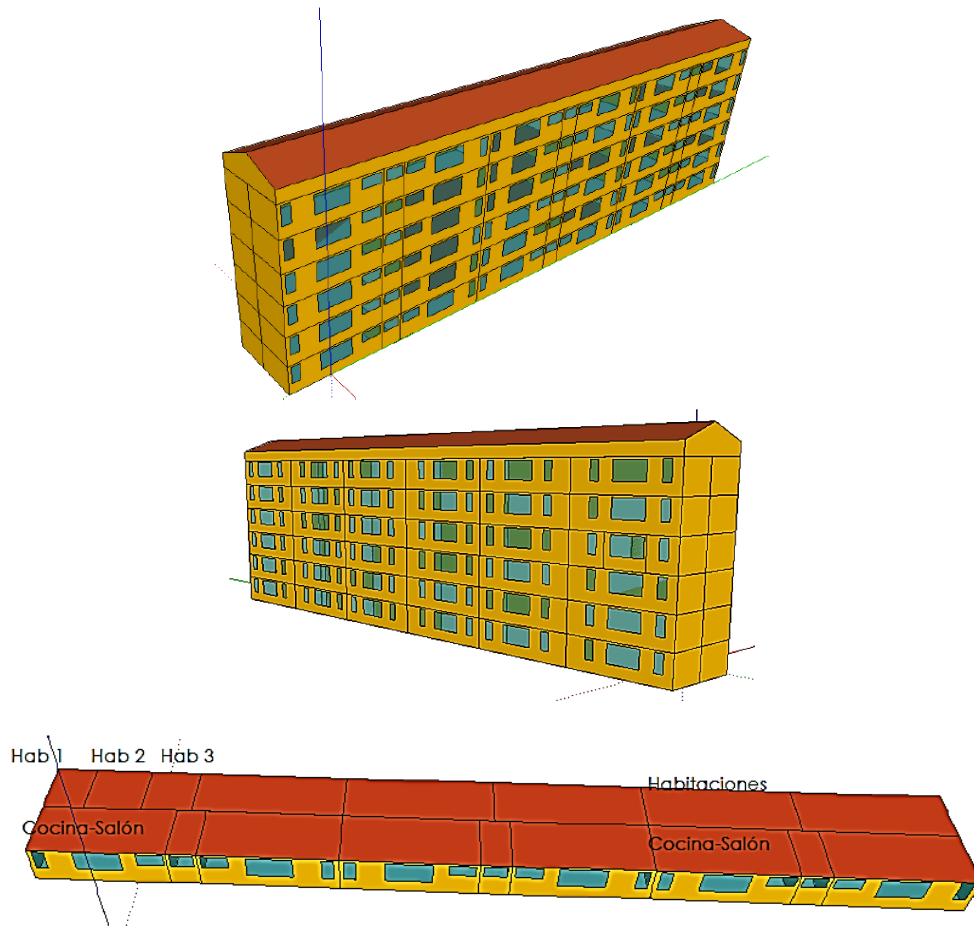


Figura 6.3 – Modelo del edificio y definición de los espacios en planta, detalle de la vivienda de referencia

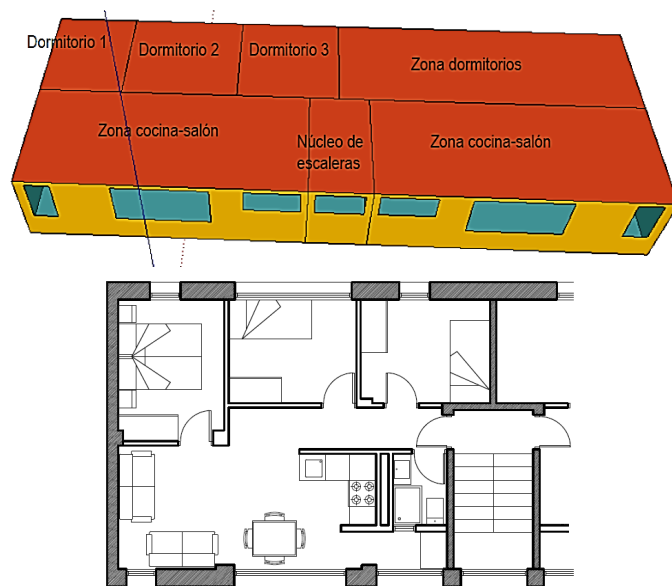


Figura 6.4 – Modelo de la vivienda de referencia

Para completar el estudio, una de las viviendas se analiza con mayor detalle, diferenciando cada una de las estancias como zona térmica en el modelo. Se selecciona como vivienda de referencia la correspondiente a la planta cuarta con la esquina sur, ver Figura 6.4, con una superficie útil de 57,82 [m²]. Una vez desarrollado el modelo geométrico del edificio y su zonificación, a continuación se pasa a definir las características térmicas de los cerramientos.

6.1.1.1 Edificio sin rehabilitar

De acuerdo a la época en la que se construyó el edificio objeto, su sistema constructivo es sencillo y realizado con recursos ajustados. En la Figura 6.5 se muestra la sección constructiva en toda la altura del edificio. En la Tabla 6.1 se recogen los datos exactos con los que se alimenta el modelo, ordenados según se sitúan las diferentes capas constructivamente desde el interior hacia el exterior. Los datos de las características de los elementos constructivos se obtienen de los ensayos realizados en los capítulos anteriores, y en el caso de los elementos no caracterizados, proceden del *Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, Código Técnico Edificación*.

Fachada	e [mm]	λ [W/mk]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kgK]
mortero cemento	10	0,35	0,028	625	1000
LHS	45	0,445	0,101	1000	1000
cámara aire	30		0,176	1,225	1007
LHD	105	0,555	0,189	920	1000
mortero cemento	10	0,35	0,028	625	1000

Cubierta	e [mm]	λ [W/mk]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kgK]
mortero cemento	10	0,35	0,028	625	1000
LHS	45	0,445	0,101	1000	1000
mortero cemento	10	0,35	0,028	625	1000
cámara aire	40		0,08	1,225	1007
teja cerámica	10	1	0,246	2000	800

Forjado	e [mm]	λ [W/mk]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kgK]
parquet	10	0,13	0,077	500	1000
cámara aire	10		0,151	1,225	1007
forjado	250	1,32	0,189	1330	1000
yeso	10	0,3	0,033	750	1000

Ventana	Vidrio	U_v [W /m²K]	Marco	U_M [W /m²K]
	simple 4 mm	5,80	aluminio sin rotura PT	5,7

Tabla 6.1 –Propiedades térmicas de la envolvente del edificio sin rehabilitar

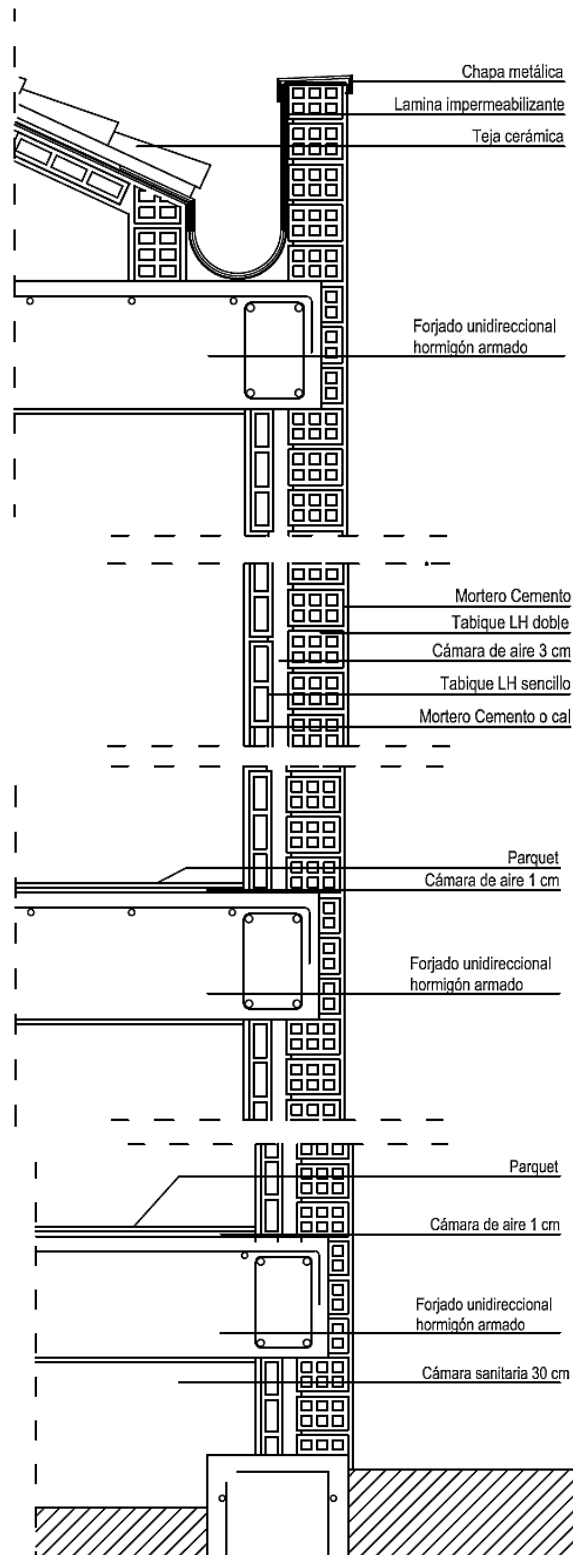


Figura 6.5 – Sección constructiva de la envolvente original del edificio

Por tanto, los datos del ensayo se emplean para la definición de las propiedades térmicas del modelo de edificio. Lo que permite obtener unos resultados más fiables

del estudio de demandas. Para la parte semitransparente de la envolvente, se considera un mismo tipo de ventana para todo el edificio. La configuración de las mismas es de marco de aluminio, vidrio monolítico de 4 [mm] y con factor solar de $g = 0,68$.

6.1.1.2 Edificio rehabilitado

Como solución de rehabilitación se actúa sobre la fachada, cubierta y ventanas. En la Figura 6.6 se muestran los detalles de la solución de rehabilitación planteada. El forjado inferior no se modifica, debido a que dicho forjado está en contacto con una cámara sanitaria, superficie inferior, y con vivienda en su cara superior. Rehabilitar este forjado en un proyecto al uso será complicado, y el objetivo del estudio es reproducir con la mayor fiabilidad las condiciones reales. En la Tabla 6.2 se recogen las propiedades térmicas de los componentes que configuran el sistema de rehabilitación. En la fachada se aplica el sistema ventilado analizado en el capítulo anterior. Para rehabilitar la cubierta se plantea un techo suspendido y en cuanto a las ventanas, el tipo de ventana simulado es de carpintera de PVC y de vidrio doble bajo emisivo, con factor solar de $g = 0,53$.

Fachada	e [mm]	λ [W/mk]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kgK]
lana mineral	100	0,044	2,727	60	860
placa cemento	15	0,254	0,059	1533	1000

Cubierta	e [mm]	λ [W/mk]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kgK]
placa yeso	15	0,3	0,050	750	1000
lana mineral	80	0,035	2,286	50	1000
paneles zinc	1	110	-	7200	400
cámara aire	40		0,08	1,225	1007
teja cerámica	10	1	0,246	2000	800

Ventana	Vidrio	U_v [W /m ² K]	Marco	U_M [W /m ² K]
	doble bajo emisivo 4/9/6	2,26	PVC dos cámaras	2,20

Tabla 6.2 –Propiedades térmicas del sistema de rehabilitación

	U [W/m ² K]	
	Edif Original	Edif Rehab
Fachada	1,45	0,35
Cubierta	2,94	0,35
Ventanas	5,77	2,24

Tabla 6.3 –Transmitancias de la envolvente original y rehabilitada

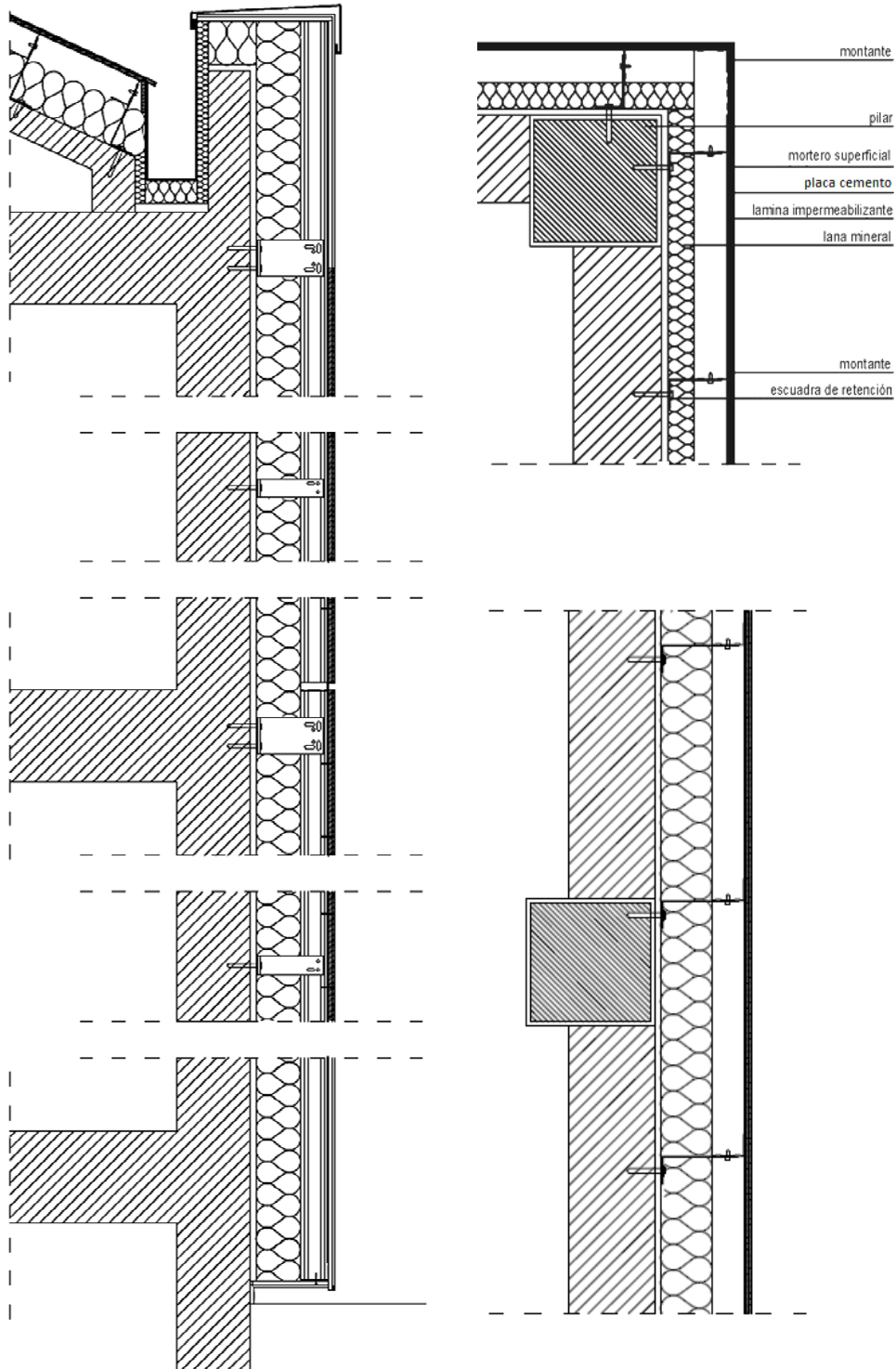


Figura 6.6 – Sección constructiva de la envolvente rehabilitada

En cuanto la solución de rehabilitación con SATE directo, el sistema constructivo es equivalente al mostrado en la Figura 6. para la fachada ventilada, pero sin la estructura de soporte de la hoja exterior y con el remate de mortero y acabado superficial de 0,5 [cm] de espesor. En la Tabla 6.3 se recoge un resumen de la comparativa de

transmitancias finales entre el edificio original y las soluciones de rehabilitación. En la determinación de las transmitancias se ha aplicado la norma *EN-ISO 6946*^[304] para el cálculo de las resistencias superficiales interiores y exteriores de los diferentes cerramientos.

6.1.2 Capacidades térmicas de los espacios, ventilación y cargas internas

Para que el cálculo de las demandas del estudio sea representativo es necesario definir adecuadamente las capacidades térmicas de los espacios, ya que afectan al comportamiento en régimen dinámico, la ventilación, que representa un porcentaje importante del consumo de energía en climatización, y por último caracterizar las cargas internas del uso. El objetivo es obtener unos resultados lo más representativos posibles. A continuación se definen estos tres componentes del estudio energético del edificio. Como referencia se toma las indicaciones de la normativa nacional para la certificación energética de edificios de uso residencial. En lo relativo a las capacidades térmicas de los espacios se tienen en cuenta los elementos del edificio que no son parte de la envolvente, como la tabiquería interior, estructura, mobiliario, o el aire mismo. En la Tabla 6.4 se recogen los datos de inercia de los espacios introducidos para la simulación.

		Zona Térmica	Vol [m ³]	Capacidad [kJ/K]
Aire	Modelo General	Viv. Zona Noche	72,8	88,7
		Viv. Zona Día	71,8	87,4
		Escalera	15,8	19,2
	Vivienda Referencia	Bajo cubierta	589	717,6
		Salón-Cocina	71,8	87,4
		Habitación 1	20	24,4
		Habitación 2	28	34,1
		Habitación 3	24,8	30,2
		Zona Térmica	Vol [m ³]	Capacidad [kJ/K]
Tabiquería Interior	Modelo General	Viv. Zona Noche	1,9	2053
		Viv. Zona Día	1,1	1172,5
	Vivienda Referencia	Salón-Cocina	1,09	1172,5
		Habitación 1	0,52	564,3
		Habitación 2	0,73	789,7
		Habitación 3	0,65	699,4
		Zona Térmica	Vol [m ³]	Capacidad [kJ/K]
Estructura Interior	Modelo General	Viv. Zona Noche	0,09	94,8
		Viv. Zona Día	0,09	94,8
		Salón-Cocina	0,09	94,8
	Vivienda Referencia	Habitación 1	0,03	31,6
		Habitación 2	0,03	31,6
		Habitación 3	0,03	31,6

Tabla 6.4 –Inercia de los espacios interiores

En el caso de la tabiquería interior se considera un espesor de particiones de 7 [cm], que tiene en cuenta el espesor del ladrillo hueco simple y los revestimientos de yeso en ambas caras. La densidad media de esta solución constructiva es de $Tab_{Int} = 1200 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, y el calor específico de $c_p = 900 \text{ [J/kgK]}$. La altura entre forjados es de 2,5 [m], y la longitud total de particiones se obtiene sobre plano, ver Figura 6.2. Para el caso de la estructura interior se considera un espesor de 9 [cm], configuradas por hormigón armado con $\rho_{EstInt} = 2300 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, y el calor específico de $c_p = 1000 \text{ [J/kgK]}$. Las capacidades térmicas totales de los espacios internos de las viviendas se han ponderado con un coeficiente de mayoración de $mob = 1,1$ debido a la presencia de una densidad de ocupación de mobiliario en la vivienda de $mob = 45 \text{ [kg/m}^2\text{]}$. De esta forma, los valores totales de capacidad térmica por espacios quedan de la forma recogida en la Tabla 6.5.

		Zona Térmica	Capacidad Térmica [kJ/K]
Espacios Interiores	Modelo General	Viv. Zona Noche	2460,5
		Viv. Zona Día	1490,1
		Escalera	19,2
		Bajo cubierta	717,6
	Vivienda Referencia	Salón-Cocina	87,4
		Habitación 1	456,4
		Habitación 2	638,9
		Habitación 3	1637,2

Tabla 6.5 –Inercia total ponderada de los espacios interiores

		Días	Franja horaria	Cargas Internas [kJ/hm ²]
Ocupación	Lunes- Viernes		00.00 – 07.00	12,64
			07.00 – 15.00	3,17
			15.00 – 23.00	6,34
			23.00- 24.00	12,64
	Sábado- Domingo	00.00-24.00	12,64	
Iluminación	Lunes – Domingo		00.00 – 07.00	0,00
			07.00 – 09.00	4,75
			09.00 – 18.00	0,00
			18.00 – 23.00	4,75
			23.00 – 24.00	0,00
Equipos	Lunes- Domingo		00.00 – 07.00	1,23
			07.00 – 09.00	4,95
			09.00 – 18.00	1,23
			18.00 – 23.00	4,95
			23.00 – 24.00	1,23

Tabla 6.6 –Ganancias internas en las viviendas

El siguiente punto en la definición del modelo de edificio son las cargas internas. La ocupación de personas en los espacios, la iluminación artificial y los equipos, electrodomésticos, ordenadores y otros elementos, aportan ganancias térmicas a los espacios de la vivienda, favoreciendo la reducción de la demanda de calefacción. Estas

ganancias internas se han definido según una programación horaria y basándose en lo que podrá ser un uso habitual de una vivienda en la que vive una familia de 4 personas. Estos valores de cargas internas afectan a cada espacio definido en función de su superficie. Los valores definidos en la simulación se recogen en la Tabla 6.6. La definición final en el modelo de TRNSYS se muestra en la Figura 6.7.

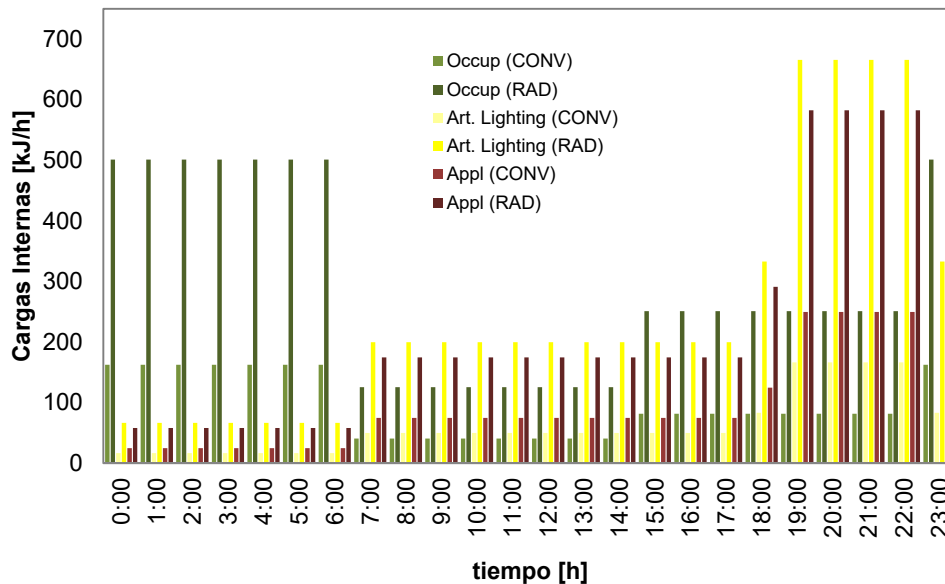


Figura 6.7 – Entrada TRNSYS de las ganancias internas en las viviendas

En cuanto a la ventilación, se ha considerado únicamente la ventilación natural, ya que en edificios con deficiencias y con necesidad de rehabilitación energética como es el caso de este edificio de referencia, en general, no existe la ventilación forzada. Y la ventilación natural se produce tanto de huecos de aire, como infiltraciones. La ventilación es necesaria para proporcionar un microclima aceptable en el espacio habitado, obteniéndose así el confort térmico y calidad óptima del aire interior.

Zona	Infiltraciones [ren/h]
Vivienda	0,6
Escalera	0,9

Zona	Periodo	Franja horaria	Ventilación [ren/h]
Vivienda	Invierno	00.00 – 07.00	0
		07.00 – 08.00	1
		08.00 – 00.00	0
	Verano	00.00 – 07.00	4
		07.00 – 08.00	4
		08.00 – 00.00	0

Tabla 6.7 –Definición de las infiltraciones y ventilación en el modelo de edificio

Periodo	Temp Consigna [°C]				
	1-7	8	9-15	16-23	24
Enero a Mayo	17	20	20	20	17
Junio a Septiembre	27	-	-	25	27
Octubre a Diciembre	17	20	20	20	17

Tabla 6.8 –Temperaturas de consignas y perfiles de aplicación

Sin embargo, la ventilación y las infiltraciones favorecen la refrigeración de los espacios de la vivienda y repercuten considerablemente en la demanda de calefacción. Las infiltraciones generan una renovación continua, no controlada, del aire en la vivienda. El valor de referencia es de 0,24 [ren/h], este valor que puede ser válido para edificios rehabilitados con buenos acabados. Sin embargo, se considera que no se asemeja a la realidad y por ello, los valores que se han definido para la simulación son los indicados en la Tabla 6.7. Estos valores se han definido en base a la experiencia adquirida de ensayos de puerta ventilador^[129] y ensayos de gases trazadores^[328] realizados en viviendas de estas tipologías en el AT del LCCE. Para definir las condiciones de ventilación se ha optado un perfil diario de valores de ventilación propuesto por el código técnico, y que intenta reproducir el uso normal y racional de la ventilación en la vivienda. Por último, queda por definir los perfiles de confort, es decir, las temperaturas de consigna y los intervalos temporales de aplicación. Estos perfiles son los correspondientes a la normativa de certificación y se indican en la Tabla 6.8.

6.1.3 Modelo del edificio con fachada ventilada

Una vez definido el edificio base, a continuación se detallan las modificaciones introducidas para el modelado del sistema de fachada ventilada. Estas modificaciones se pueden dividir en dos partes. La primera corresponde con la incorporación de la cámara de aire ventilada, definida para poder introducir el modelo desarrollado en el capítulo anterior. Y la segunda modificación se aplica para poder reproducir con exactitud los efectos en la demanda energética de los puentes térmicos que introduce los anclajes del sistema constructivo propio de la fachada ventilada. Hay varias formas de introducir una fachada ventilada en TRNSYS, desde emplear *types* propios del software, como definir uno propio que realice todo el cálculo de transmisión de calor. En este caso se opta por una solución más directa y que aprovecha al máximo la gran capacidad de cálculo del software, sobre todo en la caracterización del intercambio de calor con el ambiente exterior, como por ejemplo, el intercambio de radiación tanto de onda corta como de onda larga, el intercambio por convección... Para ello, la cámara de aire se representa como una zona térmica más del edificio. Esta nueva zona se define como adyacente a las zonas térmicas del edificio original, ver Figura 6.8. Para conectar la fachada ventilada con la envolvente del edificio original, la superficie entre las zonas térmicas interiores y la cámara ventilada se define como muro adyacente, y se compone de las capas que conforman la fachada, desde la capa más interior hasta la superficie en contacto con el aire de la cámara. Como ejemplo de esta definición, en la Figura 6.8 se muestra el esquema de la fachada oeste del edificio. Con el índice 1 se muestra el muro adyacente definido, que contempla el muro original más la capa de aislamiento, el marcador 2 corresponde con la nueva superficie final exterior formada por el panel de cemento, la zona 3 corresponde con la cámara de aire ventilada, los indicadores 4 a 9 son las zonas térmicas del interior del edificio para las diferentes plantas, y el 10 representa el espacio bajo cubierta no climatizado. Esta misma configuración se repite para todas las fachadas y las correspondientes zonas térmicas

asociadas. Una vez definido el modelo de fachada ventilada, en el Figura 6.9 se muestra el esquema de operación del proceso de cálculo de las demandas del edificio.

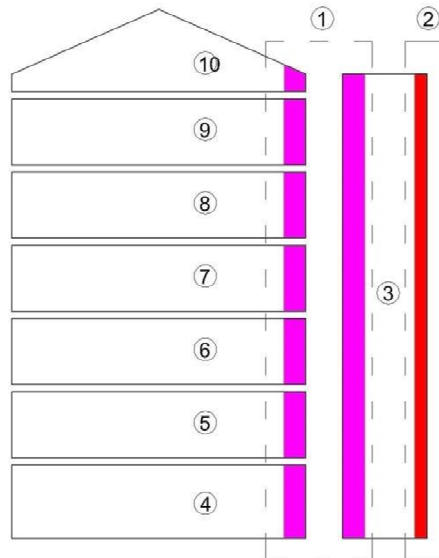


Figura 6.8 – Modelo en TRNSYS de la cámara ventilada

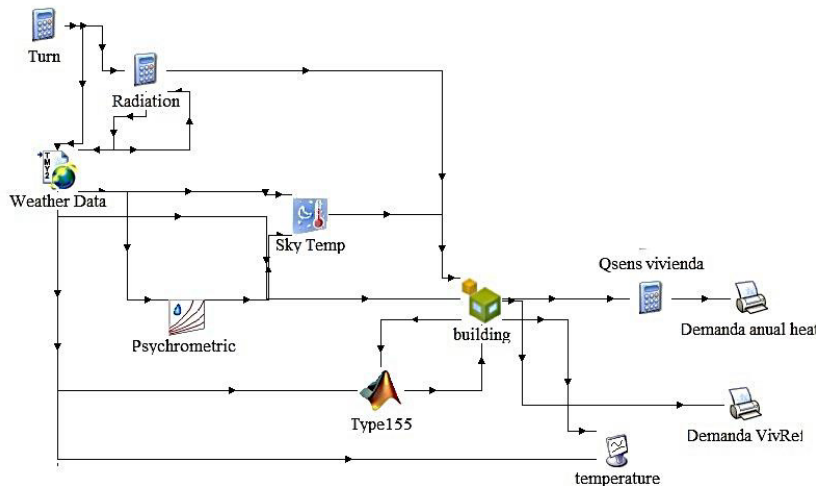


Figura 6.9 – Esquema de bloques y proceso de simulación en el modelo de TRNSYS del edificio con fachada ventilada

Para poder introducir en el edificio el modelo de fachada ventilada obtenido en el capítulo anterior, se ha desarrollado una rutina de cálculo en *MATLAB* que se introduce mediante un *type* externo que se conecta al diagrama de flujo de TRNSYS. De forma que en cada intervalo de cálculo, $time\ step = 1\ [h]$, el *type* del edificio se alimenta de las condiciones exteriores del fichero climático y de la salida del *type* de *MATLAB*, que consiste en el caudal de aire circulante por la cámara ventilada y el coeficiente de convección en cada una de las superficies que conforman la misma. Para obtener los parámetros de la cámara ventilada, el *type* de *MATLAB* recoge los datos de temperaturas superficiales y flujos de calor en cada capa durante el *time step* anterior y la temperatura exterior en ese mismo instante, que sirven como entrada a los modelos de h_{ca} y m_a .

Además del componente de fachada ventilada, principal modificación del modelo a escala de edificio, se decide completar el mismo con el efecto de los puentes térmicos debidos al sistema de anclaje de la hoja exterior. En los ensayos realizados de la probeta de fachada ventilada en la *PASLINK*, se detecta la reducción de la resistencia térmica de la capa de aislamiento debido a dichos anclajes. Por tanto, se considera necesario introducir estos efectos en el modelo de edificio para poder obtener unos resultados de demanda lo más representativos del sistema de aislamiento bajo estudio, además de caracterizar el efecto de la cámara ventilada. Las tipologías de puentes térmicos consideradas son cinco, todos ellos situados en el encuentro de la fachada con la estructura del edificio, y consisten en:

- frente de forjado,
- encuentro de fachada con solera,
- encuentro de fachada con cubierta,
- frentes de pilar tanto en zona central como en esquina.

Para introducir dichos efectos de puentes térmicos se aplica la herramienta del muro equivalente^[129]. Esta herramienta permite caracterizar con mayor precisión la repercusión en la demanda del edificio de los puentes térmicos, respecto a factor lineal de borde, Ψ_{PT} , empleado usualmente en su caracterización^[97], ya que permite representar el comportamiento dinámico de los mismos. La necesidad de aplicar esta metodología se debe a que los programas que realizan cálculos a escala de edificio sólo consideran transmisión de calor mediante flujo unidimensional. Sin embargo, en los puentes térmicos, donde la composición de los cerramientos no es homogénea, el flujo de calor se produce en más de una dimensión. Debida a esta limitación de los programas informáticos de simulación de edificios, existe la necesidad de representar el *PT* mediante un cerramiento homogéneo equivalente y trasladar este nuevo cerramiento al modelo del edificio, sustituyendo el cerramiento original en la superficie correspondiente. El método del muro equivalente se basa en calcular un muro multi-capa homogéneo de flujo de calor unidimensional que tiene el mismo comportamiento térmico dinámico que el puente térmico que se está estudiando y con la misma superficie en fachada que la afectada, ver Figura 6.10.

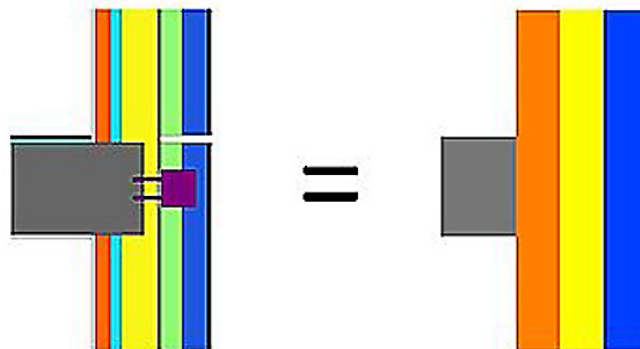


Figura 6.10 – Representación de un puente térmico mediante el muro equivalente

Como ejemplo, a continuación se muestra el procedimiento de cálculo para la tipología de puente térmico debido al encuentro del frente de forjado con la fachada. El primer paso consiste en determinar el área de influencia del efecto bidimensional en el flujo de calor. Mediante un modelo de volúmenes finitos, definido en *Fluent*®, se lleva a cabo un cálculo estacionario con un gradiente de temperatura de 20 [°C] como se especifica en la norma *ISO 10211*^[206,291]. Mediante esta simulación se obtiene el perfil de temperaturas y flujos de calor bidimensional y se determina el factor de borde Ψ_{PT} . Se

define el límite de la superficie afectada por el efecto de puente térmico como la distancia al eje de simetría del modelo, en la que el flujo de calor y la temperatura en la superficie interior son un 99% del valor en la zona con condiciones unidimensionales. Siguiendo con el ejemplo de la Figura 6.10, a continuación se muestra el análisis del encuentro entre frente de forjado y fachada. En la Figura 6.11 se puede ver el modelo de estudio para los puentes térmicos exigido por la norma, con unas dimensiones de 1 [m] desde el eje de simetría hasta las condiciones de contorno. Se muestran los perfiles de temperatura que se obtienen para la superficie interior. Siendo el valor del efecto de borde calculado mediante el factor de transmitancia lineal de $\Psi_{pT} = 0,57$ [W/mK]. Una vez determinadas las distancias de efecto del puente térmico se define un nuevo modelo del mismo ajustado a dichas dimensiones, como se muestra en la Figura 6.12, verificándose que se obtiene el mismo valor para el factor de transmitancia lineal.

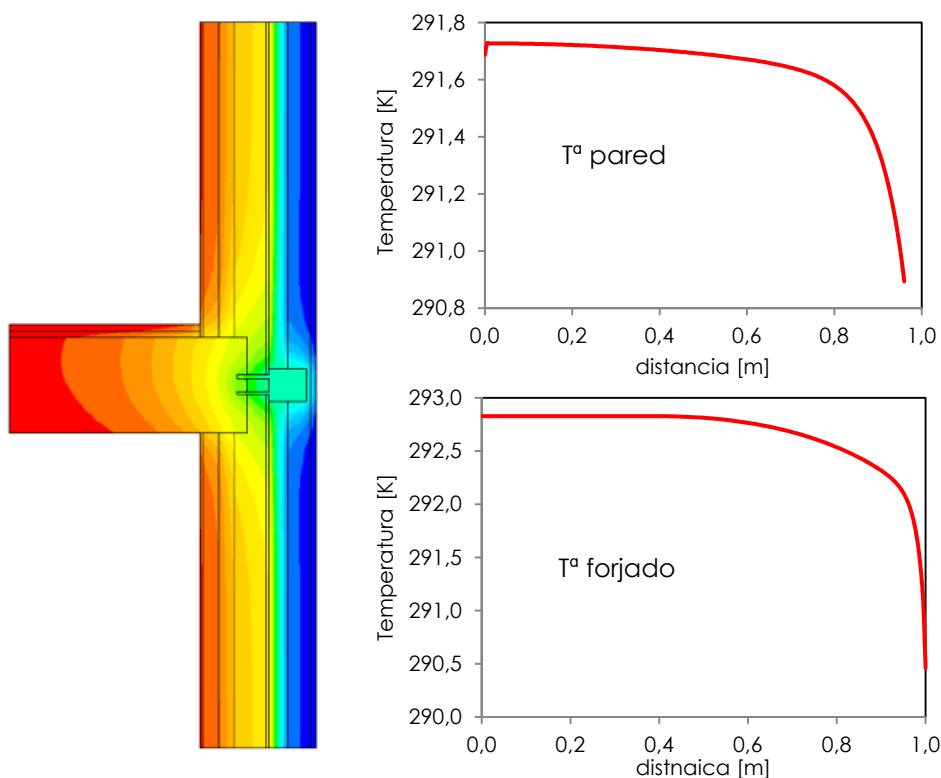


Figura 6.11 – Perfiles de temperatura en el puente térmico de frente de forjado

El siguiente paso es calcular el cerramiento equivalente unidimensional. Para ello, se vuelve a simular el modelo ajustado, pero en este caso en régimen dinámico. Así, se caracteriza el comportamiento térmico dinámico del puente térmico. En esta simulación la temperatura interior se mantiene fija a 20 °C. Y la exterior, en cambio, es variable. La temperatura exterior se reproduce con una onda de temperatura, ver Figura 6.13, que tiene una duración de 216 [h], tiempo muy superior al de respuesta de cualquier puente térmico estudiado. Dicha onda está compuesta de una serie de frecuencias, que contemplan las de mayor repercusión en el comportamiento energético del puente térmico, con frecuencia de 24 [h] y 12 [h], así como frecuencias más cortas, de 5 [h] y 2 [h], representativas de periodos puntuales de arranque de los sistemas de climatización, y de periodos más largos como 48 [h] y 72 [h], para representar la evolución dinámica de días soleados y días nublados. También se generan variaciones muy amplias de temperatura para cubrir todo el espectro de

condiciones bajo las que pueden estar evolucionando los componentes de la envolvente del edificio.

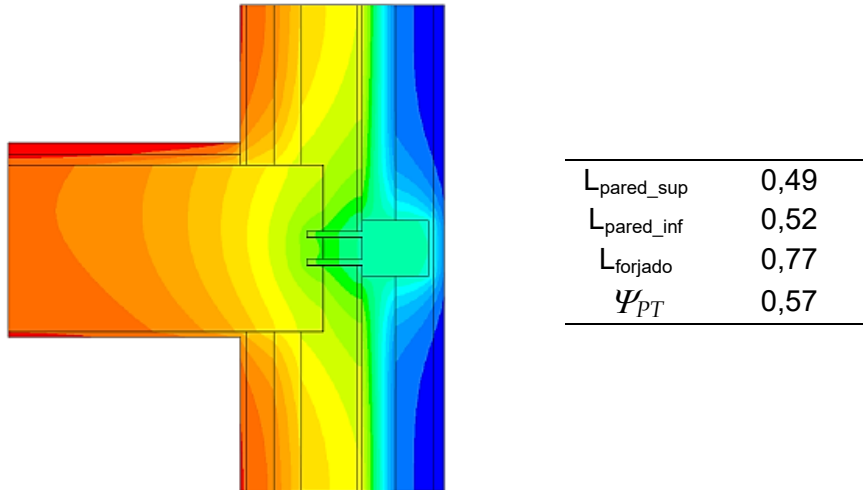


Figura 6.12 – Modelo ajustado del puente térmico para el frente de forjado

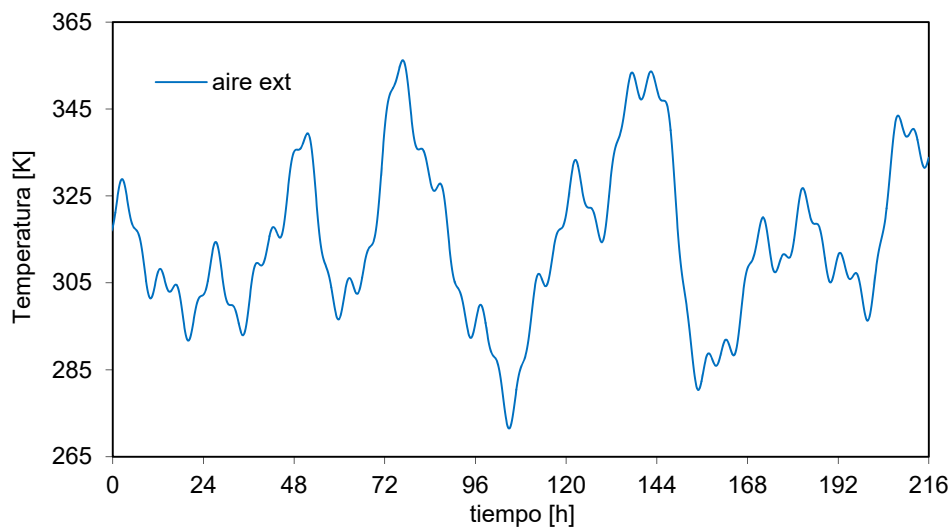


Figura 6.13 – Temperatura exterior en el estudio dinámico del puente térmico

Como salida del modelo se obtiene el flujo de calor interior, temperatura superficial interior y la temperatura superficial exterior. Sabiendo estos datos, el comportamiento térmico dinámico del puente térmico queda caracterizado. Y el siguiente paso es obtener un cerramiento equivalente que tenga la misma respuesta ante la misma excitación. Para ello se emplea un modelo de parámetros concentrados formado por tres capas que, a su vez, se componen de tres capacidades y cuatro conductancias, ver Figura 6.14. En la identificación de parámetros se emplean como funciones de entrada las temperaturas de aire interior y exterior, y como funciones objetivo las salidas del estudio dinámico, es decir, las temperaturas superficiales y el flujo de calor en la cara interior. En la Figura 6.15 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros en el ajuste de las funciones objetivo respecto a los valores de referencia obtenidos del modelo del puente térmico.

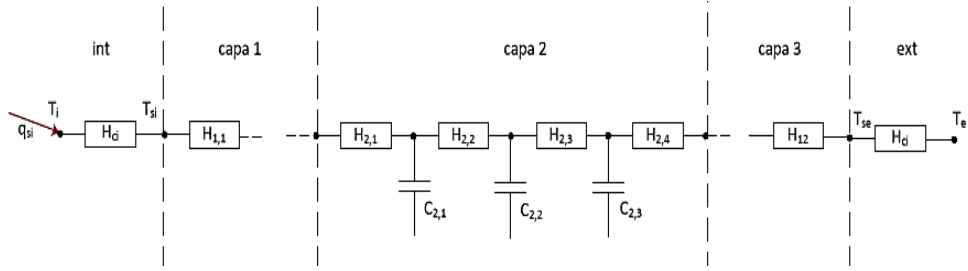


Figura 6.14 – Modelo de parámetros concentrados para el muro unidimensional

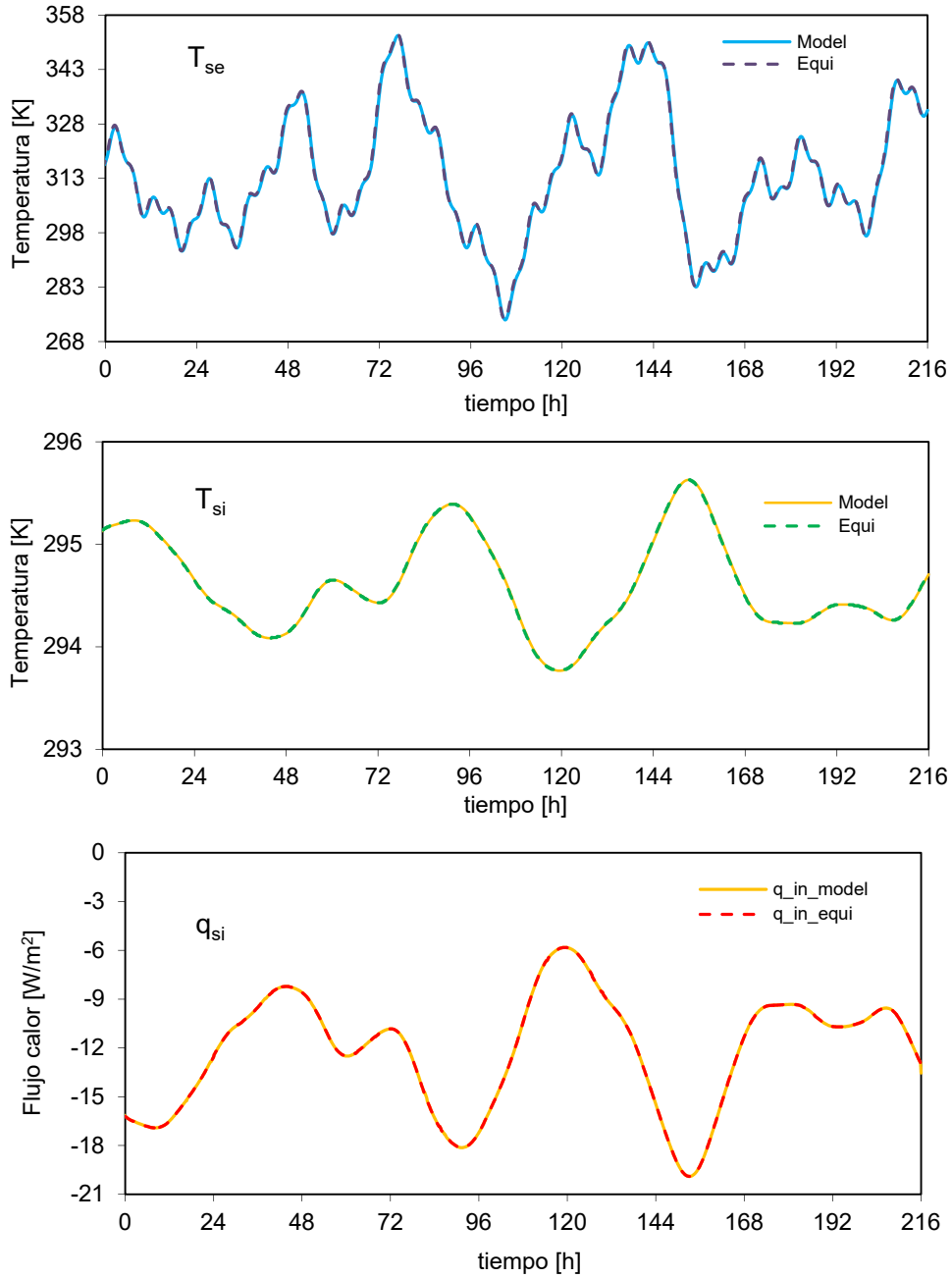


Figura 6.15 – Comparativa del comportamiento del muro equivalente respecto al modelo de puente térmico en régimen dinámico

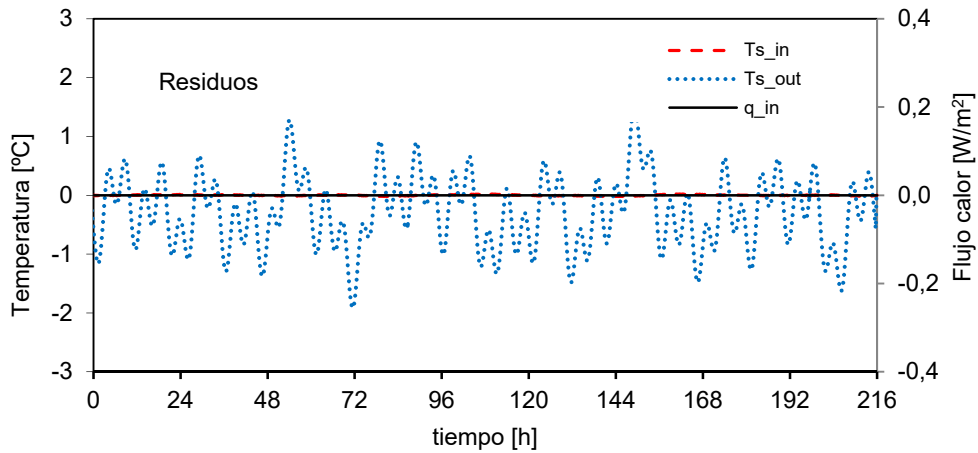


Figura 6.16 – Residuos del modelo de pared equivalente

Para poder analizar con más detalle la precisión del modelo de muro equivalente respecto al comportamiento real del puente térmico, en la Figura 6.16 se muestran los residuos para cada función objetivo. El proceso definido anteriormente se repite para la zona del frente de forjado en la que no se sitúan anclajes de fijación de los perfiles. Y los resultados finales de capa del modelo se ponderan por el número de anclajes por metro lineal.

	espesor [m]	R_t [m ² K/W]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
capa 1	0,107	0,508	0,211	0,37	1000
capa 2	0,107	0,935	0,114	2260,08	1000
capa 3	0,107	0,605	61,06	0,605	1000

Tabla 6.9 –Características capas del cerramiento equivalente para el frente de forjado (interior-exterior)

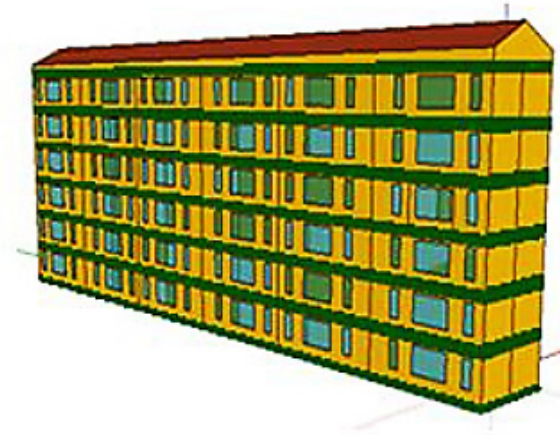


Figura 6.17 – Modelo de edificio en TRNSYS con la incorporación del muro equivalente para caracterizar el efecto de puente térmico en el frente de forjado

De esta forma se obtiene el resultado del muro equivalente unidimensional mostrado en la Tabla 6.9, empleando el mismo espesor para cada capa, de forma que el espesor final del muro equivalente sea el mismo que el de la fachada a sustituir, en este caso el correspondiente al sistema de fachada rehabilitada.

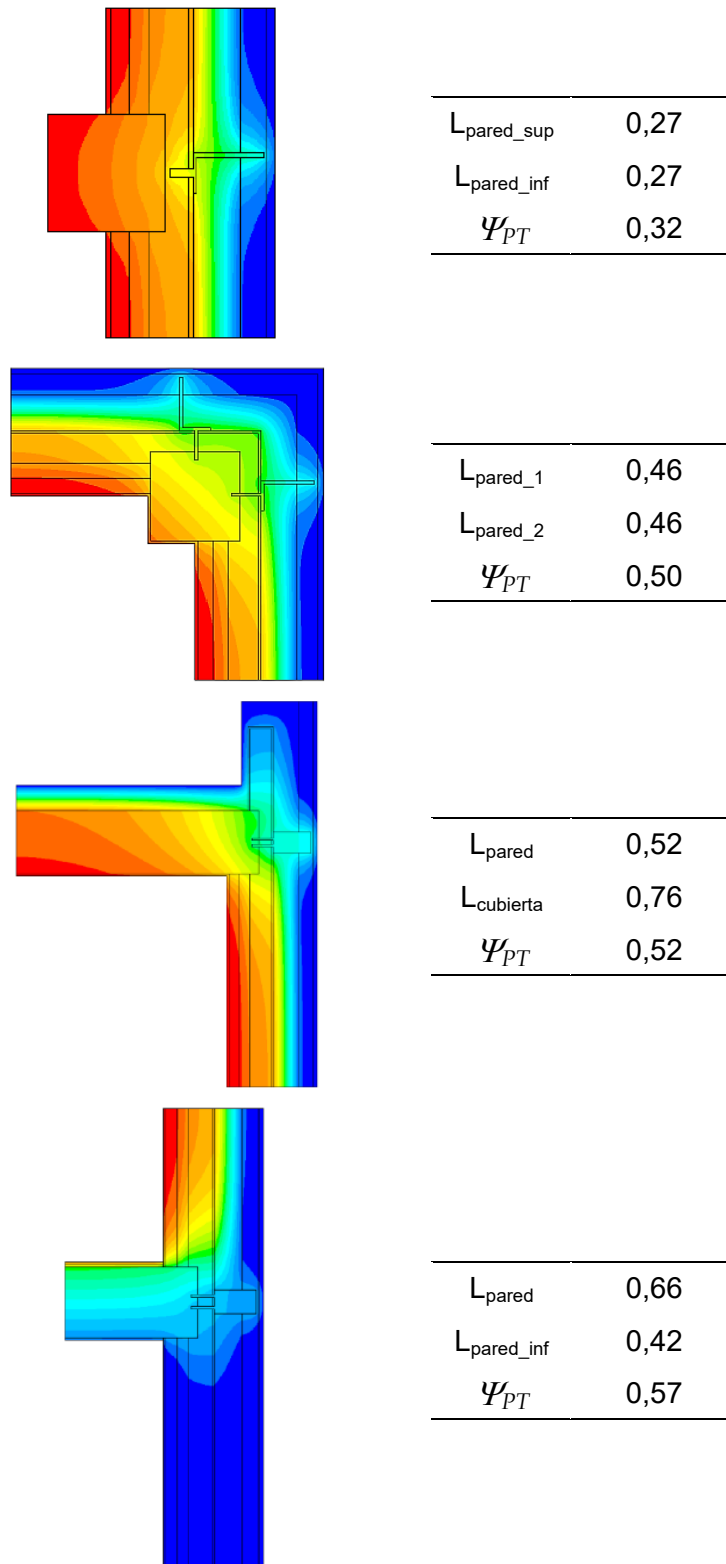


Figura 6.18 – Modelo ajustado del resto de puentes térmicos

Aunque el procedimiento del muro equivalente es costoso de calcular, simplifica en gran medida el cálculo posterior a escala de edificio. En la Figura 6.17 se muestra la

incorporación al modelo de edificio del efecto del puente térmico del frente de forjado. El procedimiento se repite para el resto de puentes térmicos definidos. En la Figura 6.18 se muestran los modelos de volúmenes finitos del resto de puentes térmicos estudiados, para las zonas con anclaje. Y en la Tabala 6.10 se recogen los datos de las propiedades térmicas de los muros equivalentes que se obtienen de ponderar con las zonas sin anclajes, que posteriormente se emplean para alimentar los datos del modelo a escala de edificio. Una vez definido el modelo a escala de edificio en el siguiente apartado se analizan los resultados de la demanda para el conjunto de casos analizados y se evalúa el potencial energético del sistema de fachada ventilada.

		espesor [m]	R_t [m^2K/W]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
pilar-fachada	capa 1	0,107	0,006	17,8	0,37	1000
	capa 2	0,107	0,166	0,645	0,37	1000
	capa 3	0,107	2,357	0,045	1158	1000
pilar-esquina	capa 1	0,107	0,115	0,930	4431	1000
	capa 2	0,107	0,166	0,645	300,5	1000
	capa 3	0,107	0,648	0,165	142,6	1000
cubierta-fachada	capa 1	0,107	0,326	0,328	3947	1000
	capa 2	0,107	0,166	0,645	994	1000
	capa 3	0,107	1,012	0,106	0,37	1000
solera-fachada	capa 1	0,107	0,037	2,892	3761	1000
	capa 2	0,107	0,166	0,645	0,37	1000
	capa 3	0,107	0,415	0,258	629,2	1000

Tabla 6.10 –Características capas de los muros equivalentes para el conjunto de puentes térmicos analizados

6.2 Resultados

Para el análisis del comportamiento energético a escala de edificio se realizan cuatro estudios:

- El primero consiste en determinar la demanda de climatización del edificio base, sin rehabilitar, que sirve de referencia y permite cuantificar el comportamiento del parque edificatorio con condiciones similares.
- El segundo estudio se realiza con un sistema de aislamiento directo. En este caso se discrimina el efecto del aislamiento de fachada opaca, el correspondiente al cambio de las ventanas, y la parta de demanda asociada a la ventilación. Este segundo estudio permite obtener la reducción de demanda alcanzable con los sistemas usuales de rehabilitación.

- El tercer estudio se base en el análisis del comportamiento del sistema de fachada ventilada, que se compara con el sistema de aislamiento directo, y además, se cuantifica el potencial energético de aprovechamiento de la cámara ventilada.
- El cuarto estudio consiste en analizar el comportamiento del sistema de fachada ventilada pero con la cámara estanca, que permite obtener una comparativa directa del efecto de la cámara activa.

El estudio se basa en el análisis de la demanda de las zonas climatizadas del edificio. No se obtienen los consumos finales, ya que éstos van asociados al rendimiento de los equipos de climatización, lo que introduce una variable no acotada en el estudio. Sin embargo, la demanda es un parámetro estrictamente asociada a las características del edificio y a la zona climática, por lo que sirve como referencia estándar de estudio. Por último, como condiciones climáticas se ha seleccionado la zona más exigente en demanda de calefacción, *zona E1* según el CTE, escogiendo una ciudad, Burgos, que además presenta una incidencia solar representativa, de forma que se pueda obtener resultados adecuados para valorar el potencial energético de los sistemas activos. La aplicación de los sistemas de fachada ventilada usualmente van ligados a climas cálidos^[291], con sistemas constructivos no usuales. Lo que se pretende en esta tesis es remarcar su competitividad energética en climas fríos, mediante el aprovechamiento del calor para la ventilación, por ejemplo, sin modificar los sistemas constructivos.

6.2.1 Demanda del edificio sin rehabilitar

Como base del estudio es necesario conocer el comportamiento energético del edificio sin rehabilitar. Para ello se realiza el estudio de un año tipo, el cual se obtiene de la base estadística de *Meteonorm*. De esta forma se realiza la simulación obteniendo los datos de la demanda de calefacción calculados en un intervalo de 1 [h].

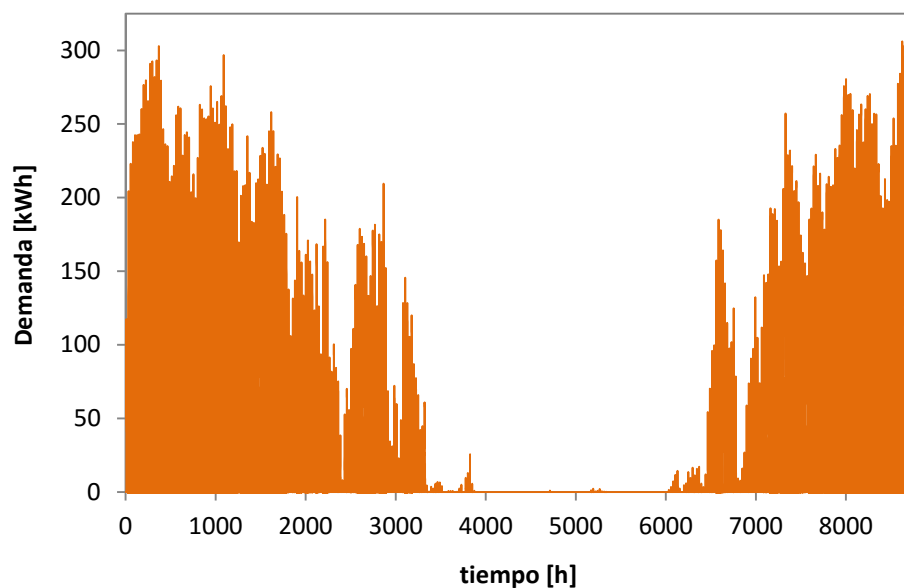


Figura 6.19 – Demanda de calefacción para el edificio completo

		DEMANDAS ANUALES [kWh/m ²]							
		Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3			
		A	B	A	B	A	B		
		SUELO							
SUR	Piso 1	125,9	111,9	111,5	111,5	112,0	129,6	NORTE	
	Piso 2	119,6	102,4	102,1	102,1	102,6	123,9		
	Piso 3	113,5	97,5	97,1	97,1	97,6	118,4		
	Piso 4	115,4	97,1	96,9	96,9	97,4	118,2		
	Piso 5	116,5	100,7	100,3	100,3	100,8	121,4		
	Piso 6	162,4	146,6	146,3	146,3	146,7	166,5		
		CUBIERTA							

Tabla 6.11 –Demandas anuales de calefacción para el edificio sin rehabilitar

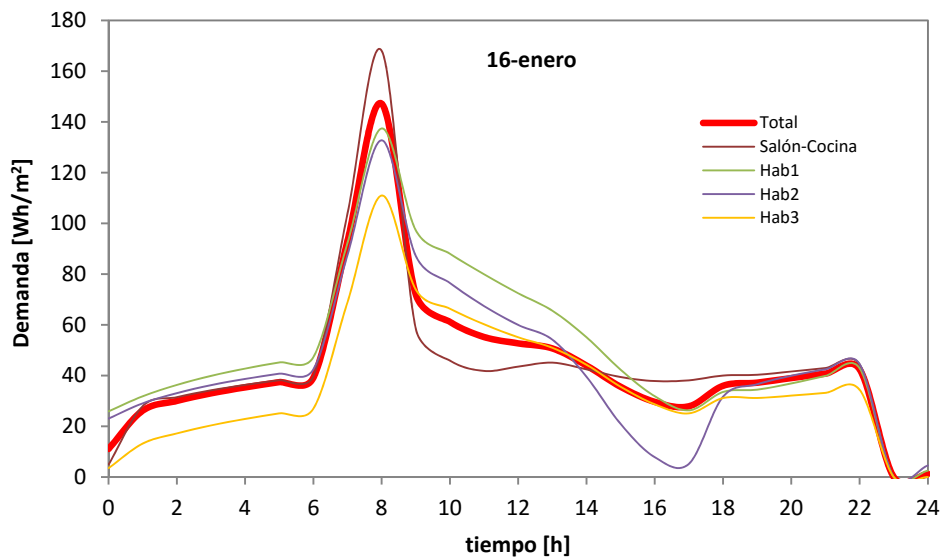
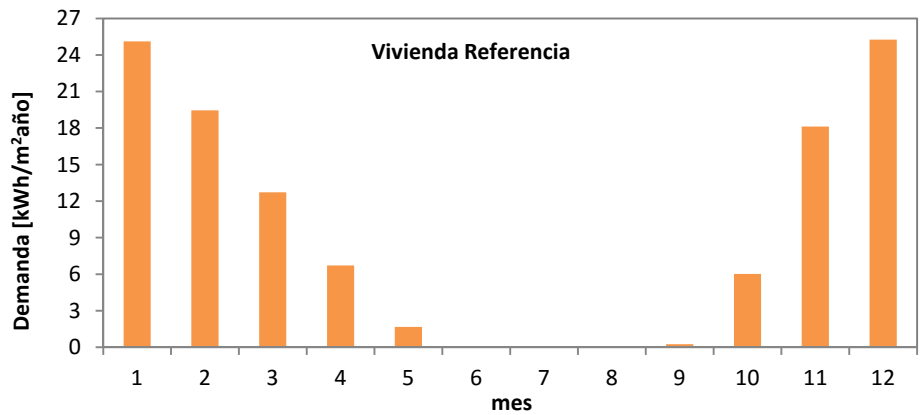


Figura 6.20 – Demanda mensual calefacción vivienda de referencia, y comportamiento para un día tipo

En la Figura 6.19 se muestran la demanda de calefacción obtenida del cálculo para el edificio completo. La demanda total anual es de 240,1 [MWh/año]; este valor permite

hacerse una idea del consumo de energía en edificios sin rehabilitar para zonas frías. Transformando el valor obtenido por superficie de vivienda se obtiene que la demanda total del edificio es de 115,4 [kWh/m²año]. Esta es una referencia de energía más empleada en la edificación. El valor obtenido se aleja mucho del límite normativo de 40 [kWh/m²año], exigido por la normativa nacional para la zona climática en estudio. Además, hay que tener en cuenta que este límite también considera la demanda de ACS. Los resultados obtenidos se alejan aún más de los estándares de edificios de consumo casi nulo, que rondan los 10-20 [kWh/m²año]. Para analizar con más detalle el comportamiento del edificio, en la Tabla 6.11 se muestran los resultados para cada una de las viviendas, en función de su posición dentro del bloque y de su orientación. Se puede ver cómo hay una gran variación entre las demandas entre viviendas, desde la más desfavorable, situada bajo cubierta y en orientación norte, que presenta una demanda 44,3% mayor que la media, hasta las viviendas entreplanta con una demanda del 16% inferior a la media.

Como se puede ver en la gráfica inferior de la Figura 6.20, la punta máxima de demanda se produce a las 8h de la mañana, cuando se imponen los 20°C de confort en el ambiente, alcanzando valores del orden de 150 [Wh/m²]. Esta punta de demanda se estabiliza en 2 [h] y durante las horas centrales del día, desde las 9h hasta las 23h, la demanda media es del orden de 45 [Wh/m²]. A partir de las 23h el ambiente de la vivienda evoluciona de forma libre, de ahí que la demanda se anule. Sin embargo se puede ver cómo en menos de 2 [h] la temperatura del ambiente interior alcanza el límite inferior de 17°C, y durante todo el periodo nocturno, desde la 1h hasta las 7h es necesario volver a aportar calor para evitar el enfriamiento excesivo, siendo la demanda media durante este periodo del orden de los 34 [Wh/m²]. También se puede ver que la orientación de las diferentes estancias repercute en la demanda horaria. Durante el amanecer el salón-cocina presente la menor demanda, ya que tiene orientación este; sin embargo, durante las horas del atardecer son las habitaciones las que presentan menor demanda, ya que tienen orientación oeste.

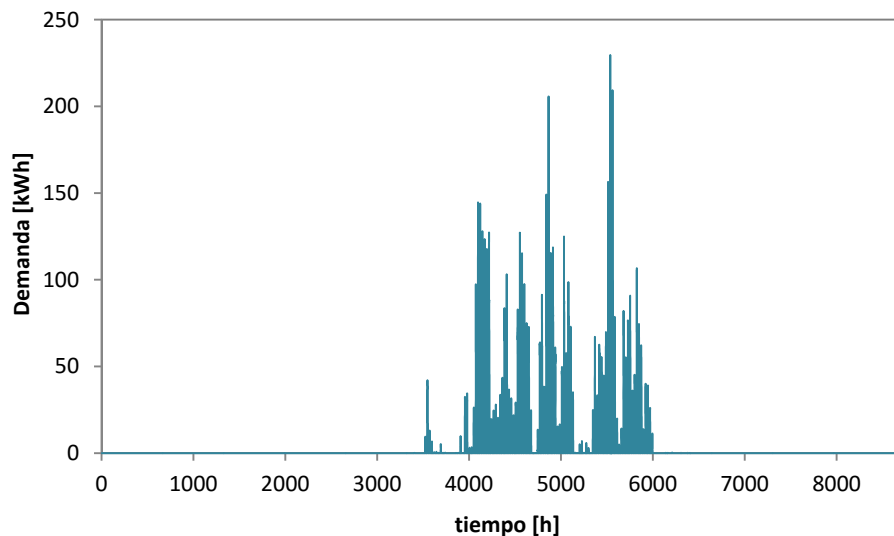


Figura 6.21 – Demanda de refrigeración para el edificio completo

Una vez evaluada la demanda de calefacción, se pasa a estudiar la demanda de refrigeración. Aunque en la zona climática de trabajo no existen grandes exigencias de refrigeración, es interesante conocer también este aspecto, ya que en el análisis del edificio rehabilitado sí se pueden producir demandas representativas si el aislamiento

es importante, dando lugar a sobrecalentamientos en las viviendas, lo que conllevaría un consumo real de energía por parte de los usuarios durante los periodos estivales. En la Figura 6.21 se muestra el perfil de demanda de refrigeración obtenido del modelo.

		DEMANDAS ANUALES [kWh/m ²]							
		Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3			
		A	B	A	B	A	B		
		SUELO							
SUR	Piso 1	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	NORTE	
	Piso 2	9,0	9,5	9,5	9,5	9,5	8,3		
	Piso 3	10,8	11,7	11,8	11,8	11,7	10,3		
	Piso 4	12,6	12,1	12,2	12,2	12,1	10,6		
	Piso 5	11,3	12,3	12,3	12,3	12,2	10,8		
	Piso 6	12,0	12,6	12,6	12,6	12,6	11,4		
		CUBIERTA							

Tabla 6.12 –Demandas anuales de refrigeración para el edificio sin rehabilitar

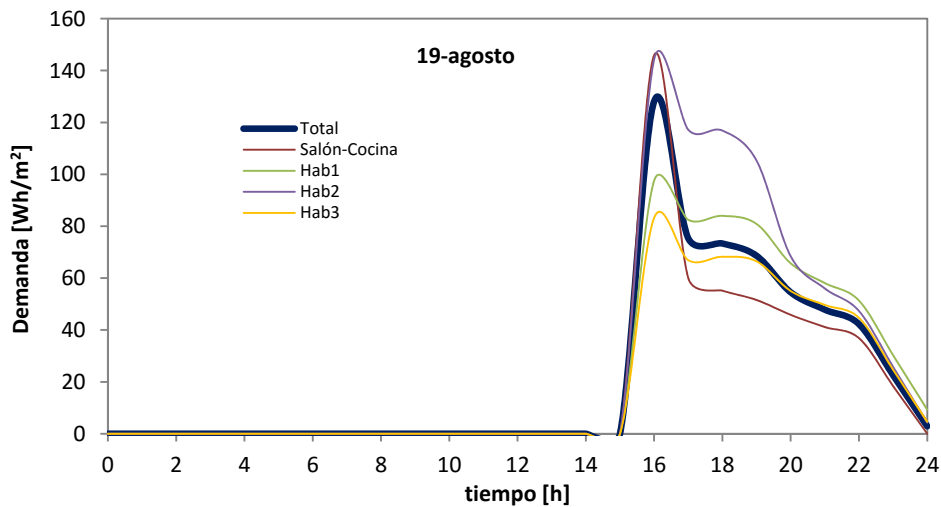
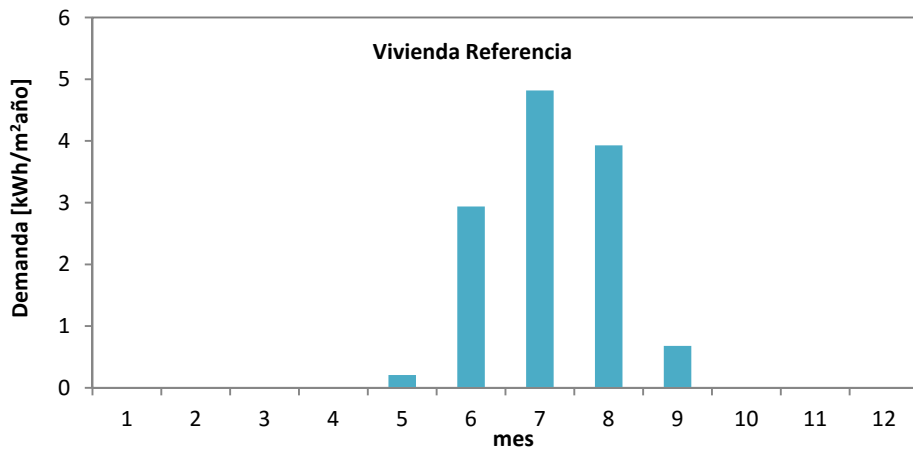


Figura 6.22 – Demanda mensual refrigeración vivienda de referencia, y comportamiento para un día tipo

La demanda total de refrigeración del edificio es de 20,4 [MWh]. Si se compara con la de calefacción es 12 veces inferior, de ahí que en la normativa nacional no existan exigencias de limitación para la zona climática bajo estudio. En cuanto a la distribución de dicha demanda por vivienda y por unidad de superficie, en la Tabla 6.12 se muestran los resultados, siendo la demanda media de 9,8 [kWh/m²año]. En este caso el patrón de comportamiento es el inverso al que se obtiene en calefacción. Las viviendas con mayor componente de envolvente presentan menores demandas, en especial las situadas en planta baja, al estar en contacto más cercano con el terreno que impone unas temperaturas de contorno más bajas que las que están en contacto con el ambiente exterior. En este caso, la vivienda de referencia se encuentra en el grupo de viviendas con demanda más alta, debido a su situación y orientación. Por tanto, permite evaluar el umbral superior de sobrecalentamientos en el periodo estival y aporta mejor criterio a la hora del análisis más detallado. Al igual que con el análisis de la demanda de calefacción, en la Figura 6.22 se muestra la demanda de refrigeración integrada por mes, y la evolución de dicha demanda, por estancias, en un día tipo que, en este caso, se corresponde con el 19 de agosto. La demanda para dicho día es de 29,8 [kWh]. El valor por unidad de superficie es de 0,52 [kWh/m²]. En este caso la punta máxima de demanda se produce hacia las 16h, alcanzando valores de 128 [Wh/m²], decreciendo paulatinamente hasta anularse a las 24h, con un valor medio de demanda durante este periodo de 60,3 [Wh/m²]. Los valores punta y medios son similares a los que se producen durante el periodo de calefacción, la gran diferencia es el intervalo de tiempo en el que se dan estas demandas. Durante el periodo de calefacción la demanda se mantiene a lo largo de todo el día; sin embargo en refrigeración, la demanda se restringe a las horas de la tarde únicamente. Una vez determinado el comportamiento energético del edificio sin aislamiento se dispone de una base de referencia para evaluar la eficacia de los diferentes sistemas de rehabilitación, que se desarrollan a continuación.

6.2.2 Demanda del edificio rehabilitado

Como primer paso, se analiza la mejora energética obtenida con los sistemas pasivos de aislamiento, es decir, los SATEs directos. Y posteriormente se compara con el comportamiento de los sistemas basados en fachadas ventiladas ligeras, cuantificando la potencialidad del aprovechamiento de la cámara de aire activa.

6.2.2.1 Demanda con aislamiento directo

En la Figura 6.23 se muestra la comparativa entre la demanda del edificio con aislamiento térmico mediante un sistema SATE respecto al edificio sin rehabilitar. La nueva demanda anual de calefacción para el edificio completo es de 82,5 [MWh], lo que representa una reducción del 65,6%. En unidades de superficie la demanda se reduce a 39,6 [kWh/m²año]. Como se ha indicado, el valor límite de demanda impuesto por la normativa vigente, es de 40 [kWh/m²año], luego para cumplir las exigencias normativas sería necesaria una cobertura de la demanda de ACS totalmente renovable. En la Tabla 6.13 se muestran los resultados para cada una de las viviendas. En este caso las viviendas con mayores demandas corresponden a las viviendas del *Piso 1*, cuya envolvente térmica presenta el forjado inferior, sobre el cual no se ha actuado introduciendo aislamiento. Si no se tiene en cuenta estas viviendas la demanda media se reduce a 36,9 [kWh/m²año].

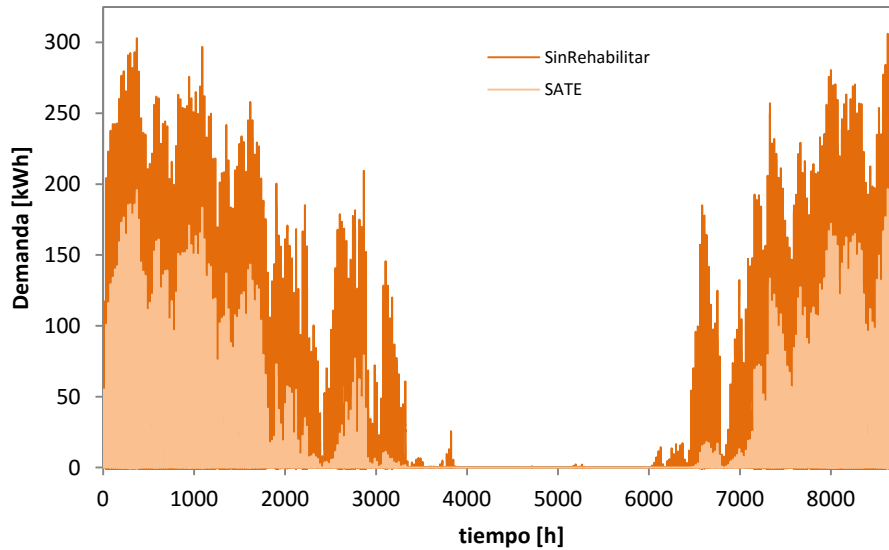


Figura 6.23 – Demanda de calefacción para el edificio completo con aislamiento directo SATE respecto al edificio sin rehabilitar

		DEMANDAS ANUALES [kWh/m ²]							
		Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3			
		A	B	A	B	A	B		
		SUELO							
SUR	Piso 1	54.08	52.66	52.56	52.56	52.68	55.41	NORTE	
	Piso 2	38.25	35.76	35.66	35.66	35.79	38.86		
	Piso 3	34.37	32.17	32.14	32.15	32.26	35.11		
	Piso 4	34.77	31.92	31.89	31.89	32.00	34.82		
	Piso 5	35.57	33.44	33.35	33.35	33.46	36.25		
	Piso 6	49.06	46.87	46.79	46.79	46.88	49.54		
		CUBIERTA							

Tabla 6.13 –Demandas anuales de refrigeración para el edificio sin rehabilitar

Como se puede ver en los resultados, la actuación de rehabilitación reduce las discrepancias existentes entre viviendas, siendo la diferencia respecto al valor medio inferior al 8% para el total de las viviendas, exceptuando las situadas bajo cubierta, y las ya mencionadas de la primera planta. Para la vivienda de referencia, en la Figura 6.24 se muestra la comparativa de los valores mensuales y la evolución para el día tipo. Si se analiza el patrón de demandas de la vivienda tipo en el edificio con aislamiento respecto al edificio original, las diferencias de comportamiento son importantes. Por un lado, la punta de demanda que se produce a las 8h se reduce a valores de 91,8 [Wh/m²], lo que representa un 40% inferior. Y durante el periodo central del día, entre las 9h y las 23h, la demanda media pasa a ser de 19,2 [Wh/m²], lo que implica una reducción del 57,2%. Durante las horas nocturnas, en las que el ambiente evoluciona de forma libre, no se alcanza la temperatura mínima de control, por lo que no se produce demanda alguna de calor. Este perfil de demanda en vivienda, no solo representa una reducción de los valores energéticos, sino que simplifica el control de operación de las instalaciones térmicas, con un funcionamiento más homogéneo permitiendo alcanzar

mejores rendimientos estacionales y con la consiguiente reducción de consumos de energía primaria.

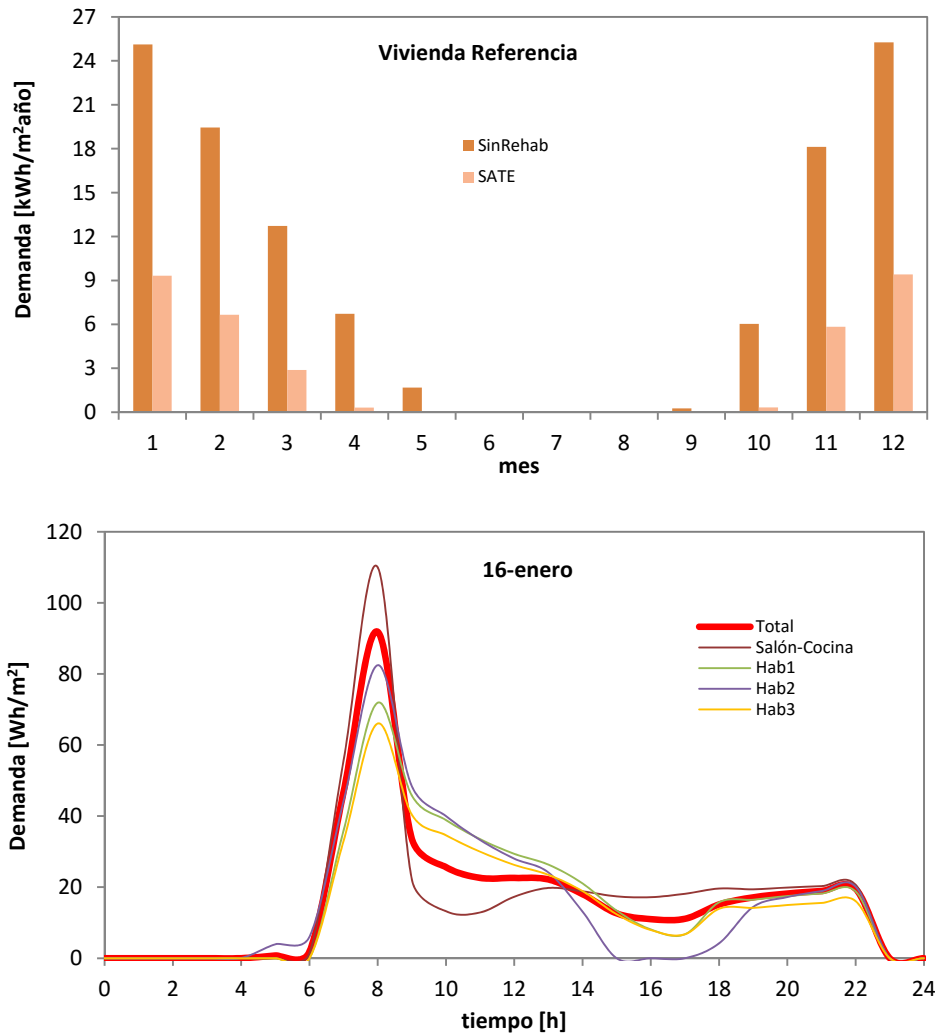


Figura 6.24 – Demanda mensual de calefacción de la vivienda de referencia con SATE respecto a la vivienda sin aislar, y comportamiento para un día tipo

Una vez valorado el edificio con aislamiento directo, antes de pasar a evaluar el comportamiento del sistema de fachada ventilada, es interesante determinar el efecto de los diferentes componentes sobre la demanda. Por un lado la repercusión del aislamiento de la parte opaca, por otro, el cambio en la transmitancia de las ventanas, y por último, la repercusión de la renovación de aire. Este análisis se realiza directamente sobre la vivienda de referencia. En la Figura 6.25 se muestra la comparativa de la demanda en calefacción en función de las componentes de la envolvente térmica. El efecto del aislamiento de fachada, sin cambio de ventanas, representa una reducción de demanda del 43,2%. Este valor es simplemente una referencia, ya que en la realidad no se podría realizar únicamente una actuación sobre la envolvente opaca, la normativa exige cumplir los requisitos totales de limitación de la demanda siempre que se modifique más de un 25% de la envolvente térmica, lo cual exigiría el cambio de las ventanas de forma simultánea. De ahí la razón de que se realice este cambio en la solución de rehabilitación del presente estudio. Pero el analizar por separado la componente opaca, permite ver el efecto del aislamiento térmico, y su necesidad de

para reducir las demandas de climatización. En cuanto al efecto del cambio de ventanas, la reducción es del 26,7%. Este cambio, por sí mismo, sí que puede darse. Ya que el cambio de ventanas puede realizarse de forma paulatina, sin alcanzar los porcentajes de envolvente que exigen el cumplimiento del código técnico.

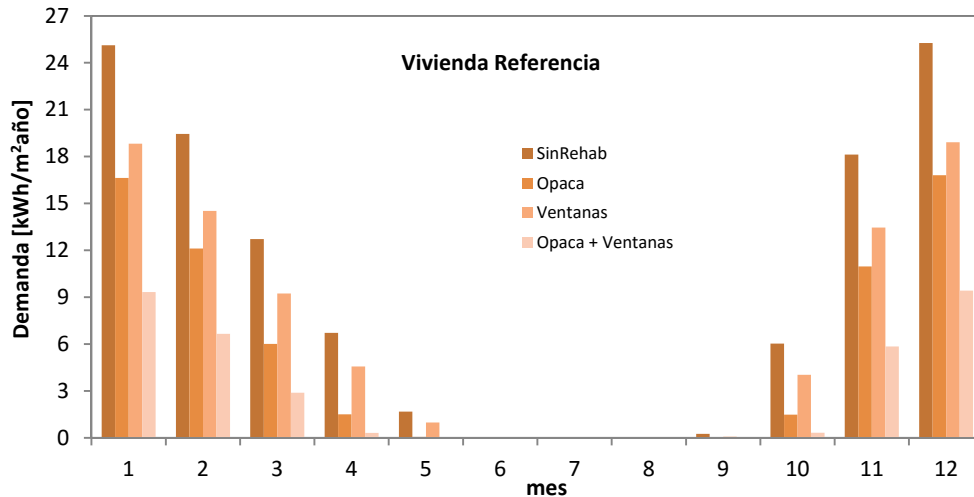


Figura 6.25 – Comparativa de la demanda de calefacción para cada elemento de la rehabilitación

	DEMANDA [kWh/m ²]												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sin Rehabilitar	25,1	19,4	12,7	6,7	1,7	0,0	0,0	0,0	0,3	6,0	18,1	25,3	115,4
Env. Opaca	16,6	12,1	6,0	1,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	11,0	16,8	65,56
Ventanas	18,8	14,5	9,2	4,6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,1	4,0	13,5	18,9	84,6
Rehab Integral	9,3	6,7	2,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	5,8	9,4	34,8

Tabla 6.14 –Demandas de calefacción para cada elemento de la rehabilitación

En este caso, las prestaciones térmicas de la tipología de ventana seleccionada no son muy exigentes, de forma que su repercusión en la demanda no es elevada. De hecho, se ha seleccionado la ventana que cumple los requisitos normativos de forma ajustada. Por tanto el margen de mejora en este punto es muy elevado, y el porcentaje no es representativo del resto de actuaciones de rehabilitación. Sin embargo, en el presente estudio, el objetivo principal es evaluar el comportamiento del sistema de fachada activa respecto a las envolventes pasivas, y por tanto, se busca reducir los efectos del resto de componentes que podría enmascarar dicha comparativa. Para la vivienda de referencia, la actuación global alcanza una reducción de la demanda del 70%. El resultado demuestra la necesidad de actuaciones globales para alcanzar resultados óptimos a escala de edificio. En la Tabla 6.14 se recogen los datos exactos de demandas de calefacción por mes para la vivienda tipo y las diferentes componentes analizadas. Una vez evaluado el aporte de cada elemento de la envolvente térmica del edificio a la demanda, queda por evaluar el efecto de la ventilación. En la Figura 6.26 se muestra el reparto de demanda de calefacción por cada mes en la parte correspondiente a pérdidas por la envolvente y la debida a la renovación del aire. La demanda total debida a ventilación es de 15,5 [kWh/m²], lo que representa un 44,6% del total de la energía demandada para la climatización. El porcentaje es importante, y muestra cómo una vez que el aislamiento de la envolvente es elevado, el componente de la demanda que corresponde a ventilación comienza a cobrar una repercusión importante. Para

entender mejor la evolución de la demanda, en la gráfica inferior de la Figura 6.26 se muestra la curva de energía cedida por renovación de aire para el día tipo. Esta energía participa de la demanda durante el periodo en el que se imponen las condiciones de confort de las zonas climatizadas. En el día tipo seleccionado la demanda total es de 409,5 [Wh/m²], de la cual 169,4 [Wh/m²], un 41,4%, corresponden a ventilación. Se puede ver cómo durante el periodo central del día, las pérdidas por renovación de aire es el elemento más representativo de la demanda.

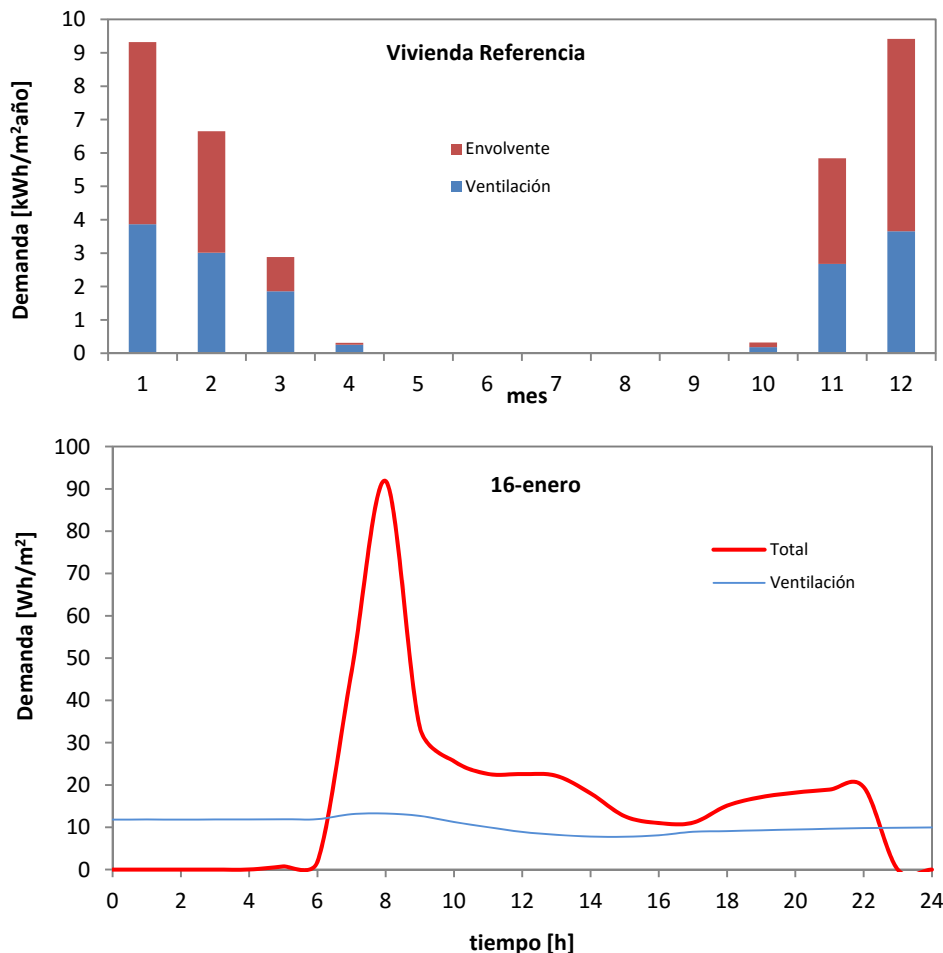


Figura 6.26 – Reparto demandas vivienda referencia con aislamiento y comportamiento para el día tipo

En base a los resultados obtenidos, y cuantificando la importancia de las pérdidas de calor debidas a renovación de aire de las viviendas, el sistema de fachada ventilada presenta un potencial de aprovechamiento importante. La cortina de aire que recorre la cámara ventilada permite disponer de un fluido caloportador que recoge el calor absorbido por la hoja exterior, durante los periodos de incidencia solar, y permite introducirlo en la vivienda con una reducción de la demanda. Este potencial se pierde en los sistemas pasivos. En el siguiente apartado se cuantifica el alcance de dicho potencial. Pero antes de evaluar el sistema de fachada ventilada queda por analizar la repercusión en la demanda de refrigeración del aislamiento. En la Figura 6.27 se muestra dicha demanda para el edificio completo, que pasa a ser de 48,1 [MWh]. En este caso, la demanda de refrigeración es más del doble que para el edificio original, en concreto un 57,6% mayor. Y ya no está tan alejada de la demanda de calefacción, ya que es prácticamente la mitad, un 41,7%, por lo que pasa a tener un peso representativo en los consumos de energía del edificio.

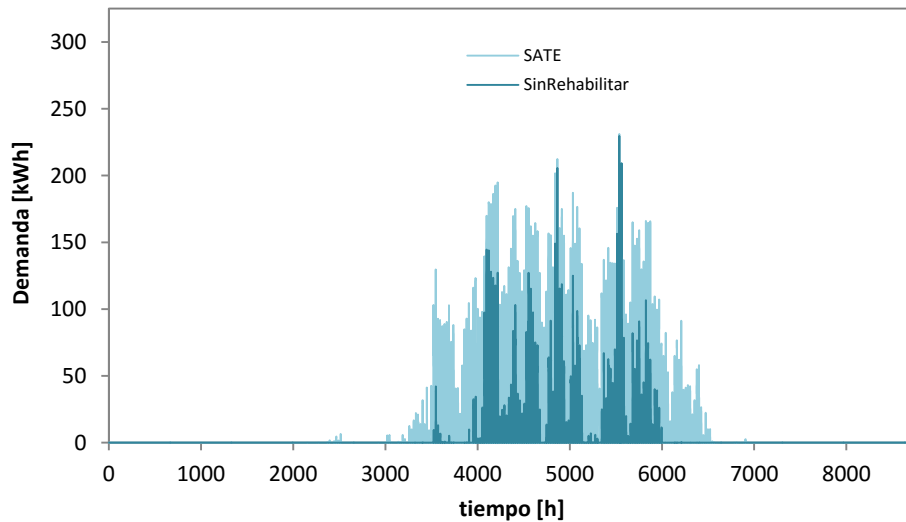


Figura 6.27 – Demanda de refrigeración para el edificio completo con aislamiento

DEMANDAS ANUALES [kWh/m ²]								
		Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3		
		A	B	A	B	A	B	
SUELO								
SUR	Piso 1	3.22	3.27	3.23	3.24	3.35	1.87	NORTE
	Piso 2	21.12	21.89	21.93	21.92	21.81	21.84	
	Piso 3	27.36	28.35	28.41	28.38	27.86	27.43	
	Piso 4	28.67	29.71	29.78	29.76	29.58	26.73	
	Piso 5	28.59	29.58	29.64	29.64	29.59	29.13	
	Piso 6	26.88	27.67	27.70	27.70	27.68	27.14	
CUBIERTA								

Tabla 6.15 –Demandas anuales de refrigeración para el edificio con aislamiento

Este es un resultado típico en edificios con un grado de aislamiento importante, en los que se pueden generar problemas de sobrecalentamiento en los periodos estivales. Exigen una atención especial, como la integración de sistemas de sombreado para evitar excesivas ganancias solares que los edificios originalmente no presentaban, como es el caso del edificio que se emplea como base del estudio. Como sucede con el edificio sin rehabilitar, las viviendas en planta baja son las que presentan los mínimos de demanda. Y la vivienda de referencia se encuentra en el grupo de viviendas con demanda más alta. En la Figura 6.28 se muestra la demanda de refrigeración integrada por mes y la evolución de dicha demanda, por estancias, para el día tipo. La demanda para dicho día es de 24,7 [kWh]. El valor por unidad de superficie es de 0,43 [kWh/m²]. Con la envolvente aislada la demanda se retrasa hacia las 18h, alcanzando valores de 75,2 [Wh/m²]. Sin embargo esta punta no se reduce rápidamente como en el edificio sin rehabilitar; en cambio la demanda se mantiene elevada hasta las 20h, para comenzar a descender de forma más apreciable durante las horas finales del día, aunque manteniendo valores de demanda importantes. En las curvas de demanda por estancia, destaca ver cómo la *habitación 2* presenta la mayor demanda con diferencia. Esto se debe a que está orientada hacia el oeste, y presenta una superficie de ventana

importante, de forma que recibe bastante incidencia solar durante las horas de la tarde, lo que conlleva altas temperaturas del ambiente exterior.

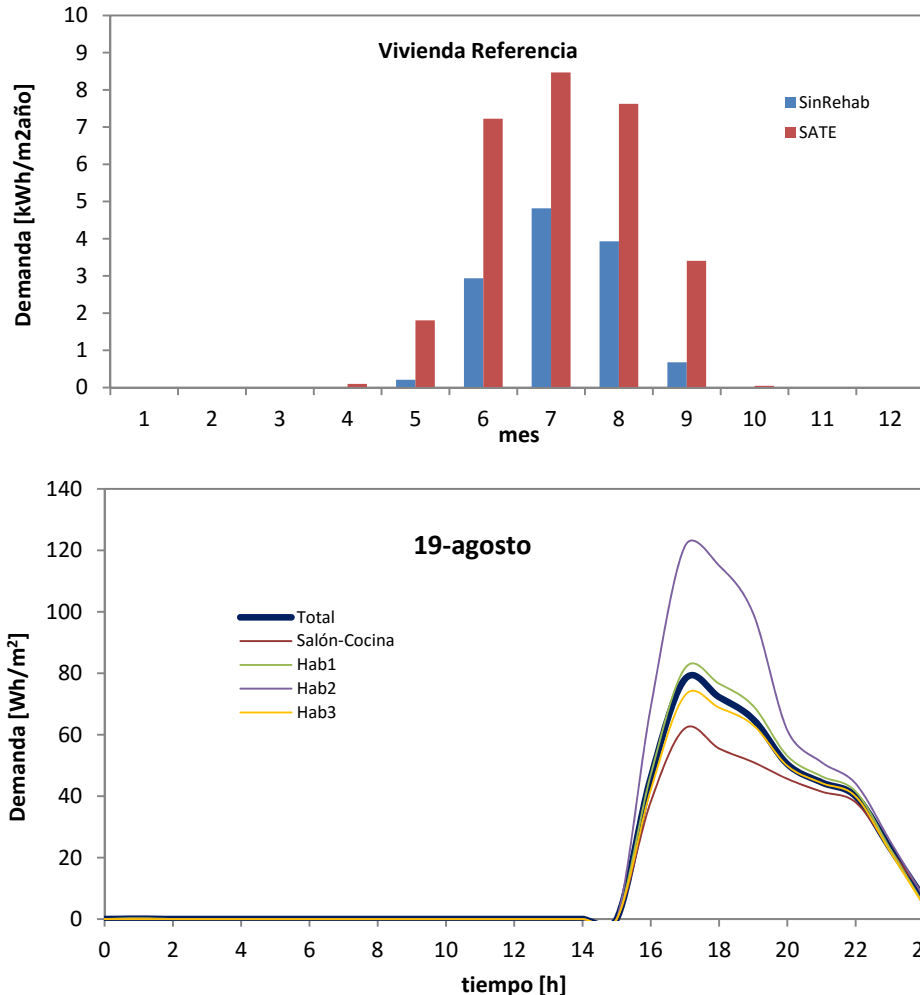


Figura 6.28 – Demanda mensual de refrigeración de la vivienda de referencia, y comportamiento para un día tipo en el edificio con aislamiento

Una vez analizado el comportamiento del edificio con aislamiento pasivo, en el siguiente apartado se compara con la respuesta de la envolvente activa y se analiza el potencial de aprovechamiento de la cámara de aire ventilada.

6.2.2.2 Demanda con fachada ventilada

En la Figura 6.29 se muestra la comparativa entre la demanda del edificio con fachada ventilada respecto al edificio sin rehabilitar. La nueva demanda anual de calefacción para el edificio completo es de 91,3 [MWh], lo que representa una reducción del 62%. Respecto al edificio con aislamiento SATE, se produce un aumento de la demanda de calefacción del 10,6%, que equivale a 8,8 [MWh], lo que muestra el efecto refrigerante del sistema de fachada ventilada que se observa en los ensayos experimentales. En unidades de superficie, la demanda pasa a ser de 43,4 [kWh/m²año].

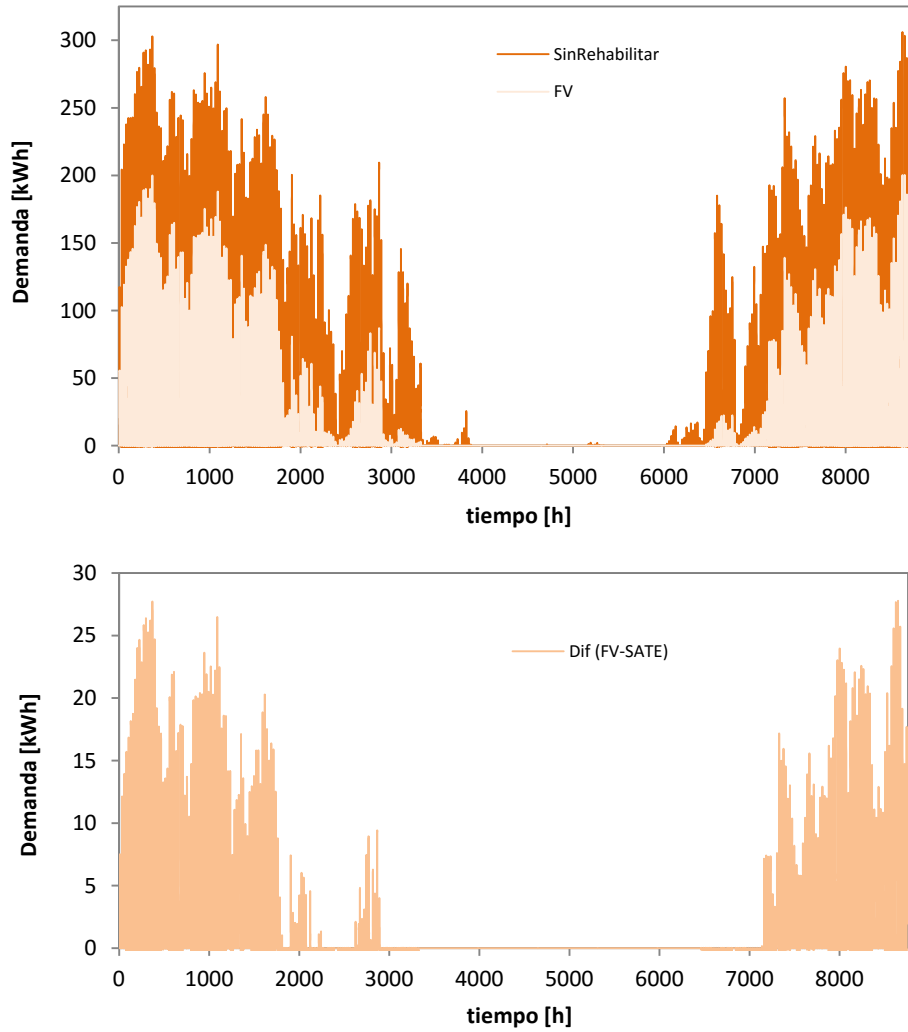


Figura 6.29 – Demanda de calefacción para el edificio completo con fachada ventilada respecto al edificio sin rehabilitar y diferencia de demanda respecto al edificio con aislamiento SATE

DEMANDAS ANUALES [kWh/m ²]							
		Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3	
		A	B	A	B	A	B
		SUELO					
SUR	Piso 1	59.33	56.74	56.57	56.56	56.72	60.31
	Piso 2	42.71	39.00	38.85	38.85	39.01	42.95
	Piso 3	38.54	35.17	35.09	35.09	35.23	38.94
	Piso 4	38.99	34.88	34.82	34.82	34.96	38.63
	Piso 5	39.83	36.55	36.42	36.42	36.56	40.20
	Piso 6	54.70	51.39	51.27	51.27	51.39	54.85
		CUBIERTA					
		NORTE					

Tabla 6.16 – Demandas anuales de calefacción para el edificio con fachada ventilada

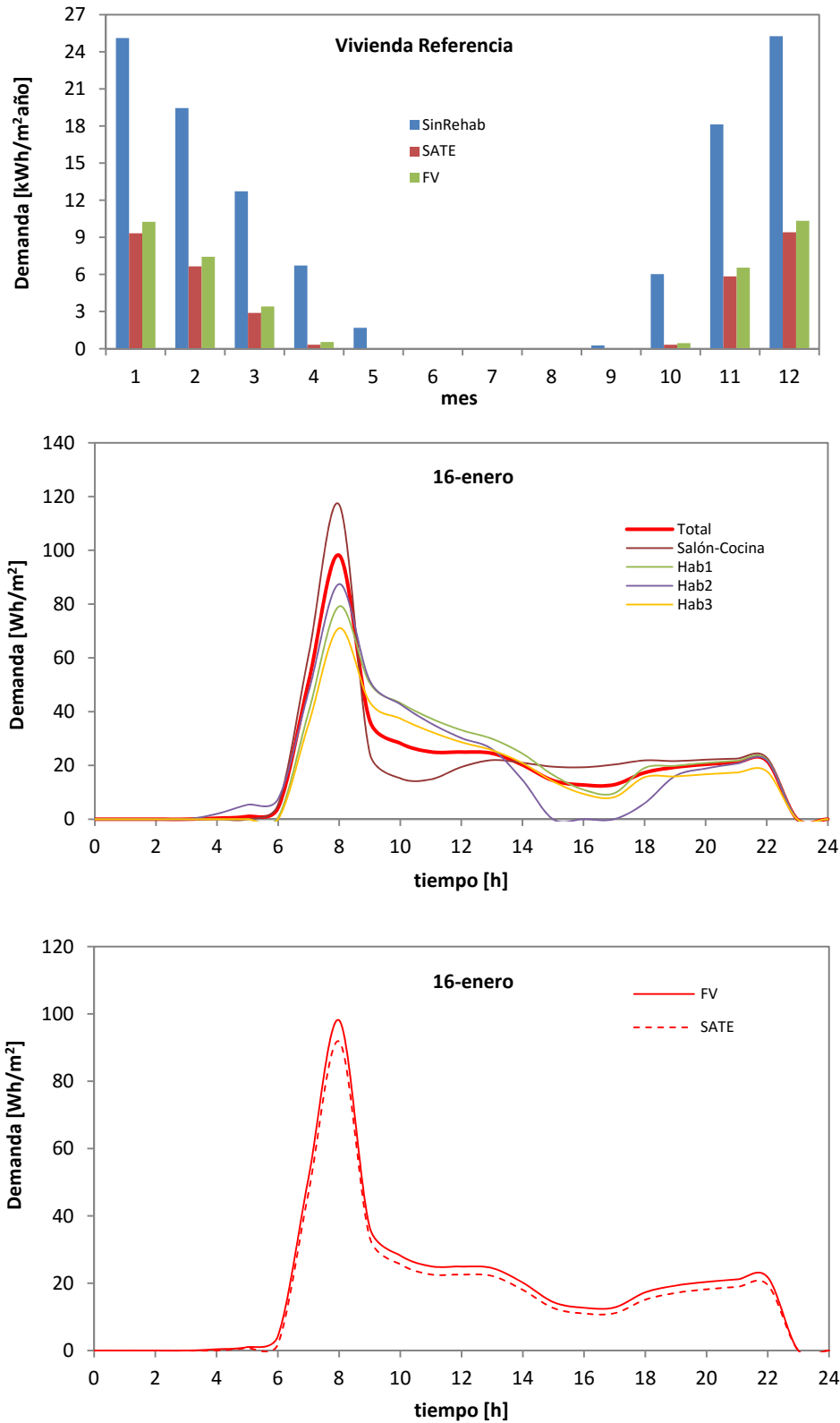


Figura 6.30 – Demanda mensual de calefacción de la vivienda de referencia con fachada ventilada respecto a la vivienda sin aislar y la vivienda aislamiento SATE, y comportamiento para un día tipo

DEMANDA [kWh/m ²]													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Sin Rehabilitar	25,1	19,4	12,7	6,7	1,7	0,0	0,0	0,0	0,3	6,0	18,1	25,3	115,4
SATE	9,3	6,7	2,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	5,8	9,4	34,8
FV	10,3	7,4	3,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	6,5	10,3	39,0

Tabla 6.17 –Demandas de calefacción en la vivienda tipo

En este caso, para el mismo espesor de aislamiento térmico, no se cumple el límite de demanda normativo, ya que se superan los 40 [kWh/m²año] exigidos. Para evaluar con mayor detalle el comportamiento de los dos sistemas de rehabilitación, en la gráfica inferior de la Figura 6.30 se muestra la diferencia de demandas entre ambos. Con esta configuración las diferencias son más acentuadas durante los periodos de primavera y otoño, debido a la geometría y orientación del edificio, que presenta mayor superficie de fachada con disposición este-oeste. Con otras geometrías la diferencia de demanda podría ser mayor incluso. Otra forma de evaluar el efecto refrigerante del sistema de fachada ventilada es determinar el espesor de aislamiento directo con el que se obtendría la misma demanda total. Este espesor es del orden de los 6 [cm]; por tanto, el efecto refrigerante equivale a perder 4 [cm] eficientes de los 10 [cm] instalados. En cuanto a la distribución de demandas por viviendas, en la Tabla 6.16 se muestran los resultados. Aunque las viviendas con mayores demandas siguen correspondiendo a las situadas en el *Piso 1*, las viviendas bajo cubierta también presentan valores elevados. Para la vivienda de referencia, en la Figura 6.30 se muestra la comparativa de los valores mensuales y la evolución para el día tipo. En la Tabala 6.17 se recogen los datos exactos. En la gráfica inferior de la Figura 6.30 se puede ver cómo la demanda del sistema de fachada ventilada es siempre superior a la del sistema con aislamiento directo.

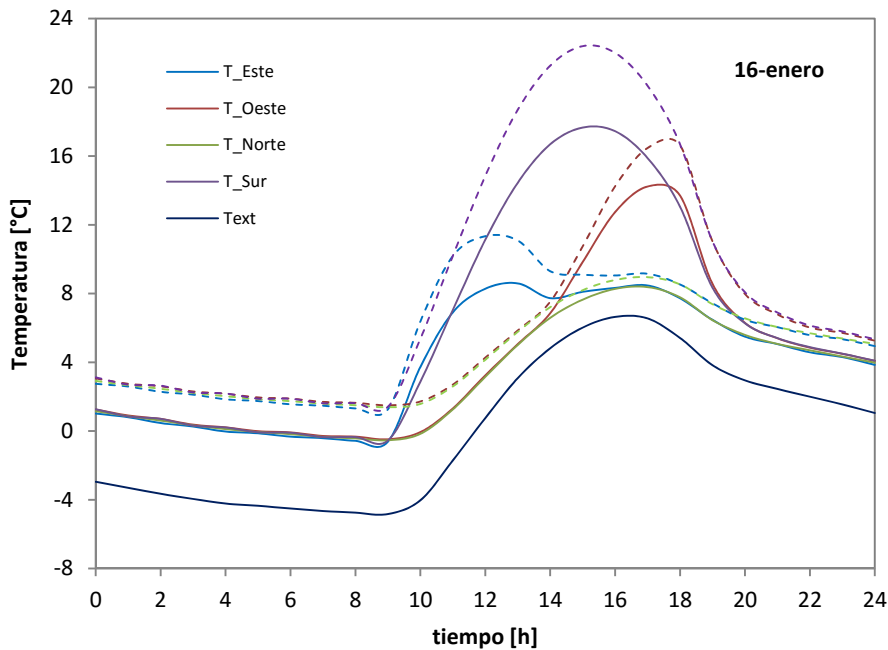


Figura 6.31 – Temperaturas medias en la cámara de aire en la fachada ventilada, líneas continuas, y en la fachada con SATE, líneas discontinuas

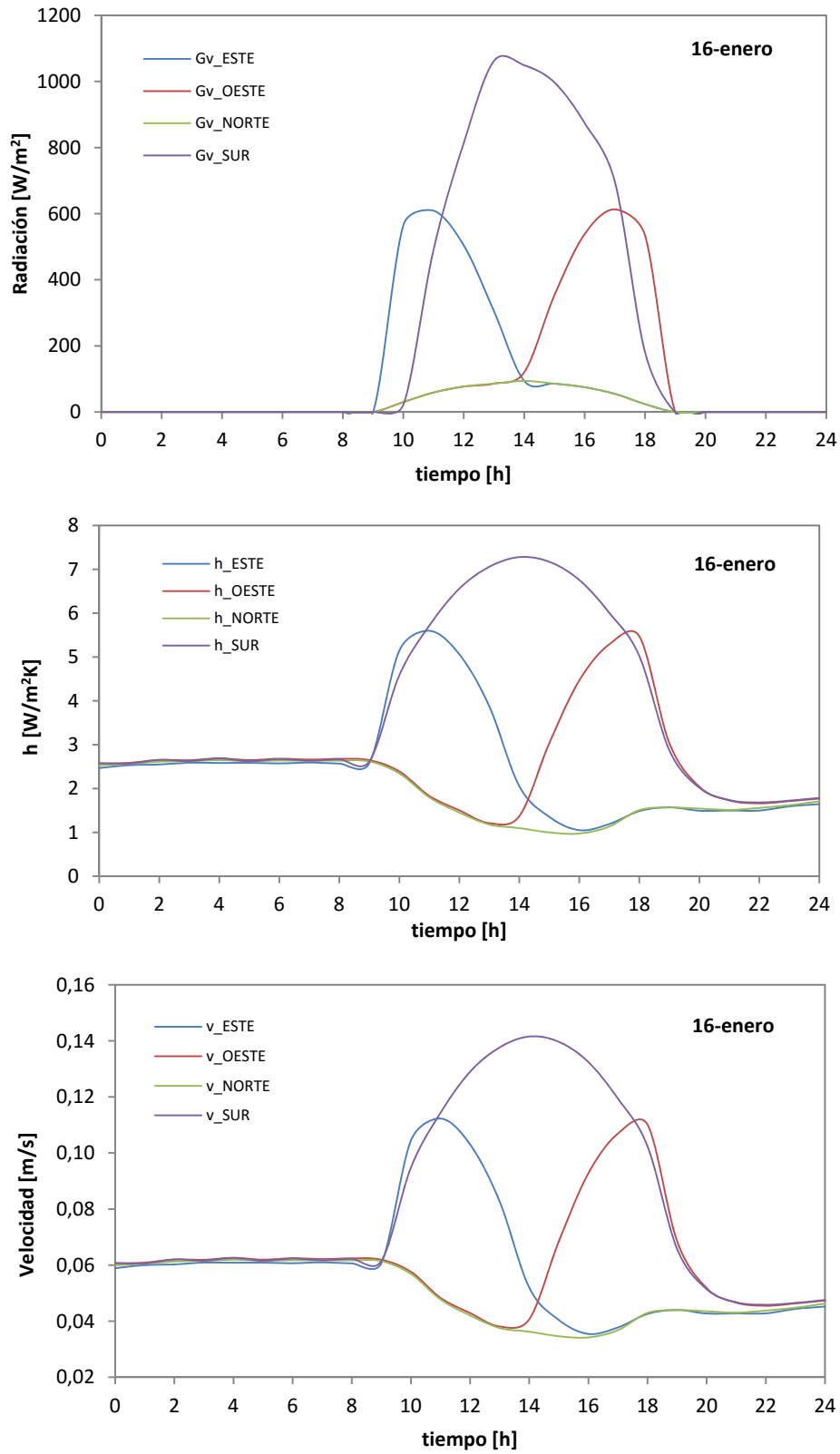


Figura 6.32 – Incidencia solar sobre superficie vertical, coeficientes de convección y velocidades en la cámara ventilada para cada orientación

Para entender mejor esta diferencia de demandas entre los dos tipos de sistemas de rehabilitación, en la Figura 6.31 se muestra las temperaturas medias de la cámara de aire para el día tipo. Estas temperaturas corresponden a cada una de las orientaciones. Se puede ver que las temperaturas son siempre inferiores para la fachada ventilada, con valores de 2°C menos durante el periodo nocturno, lo que implica mayores pérdidas a través de la envolvente, y de hasta 5°C, como es el caso de la fachada sur, durante el periodo de incidencia solar, lo que representa menores ganancias solares.

16-ene					
	ESTE	OESTE	NORTE	SUR	
Qca	112.0	121.5	94.5	332.7	[Wh/m ²]
	106.8	115.9	11.9	41.9	[kWh]
Gv	4.8	5.0	16.1	5.4	%

Tabla 6.18 –Calor absorbido en cada fachada para el día tipo

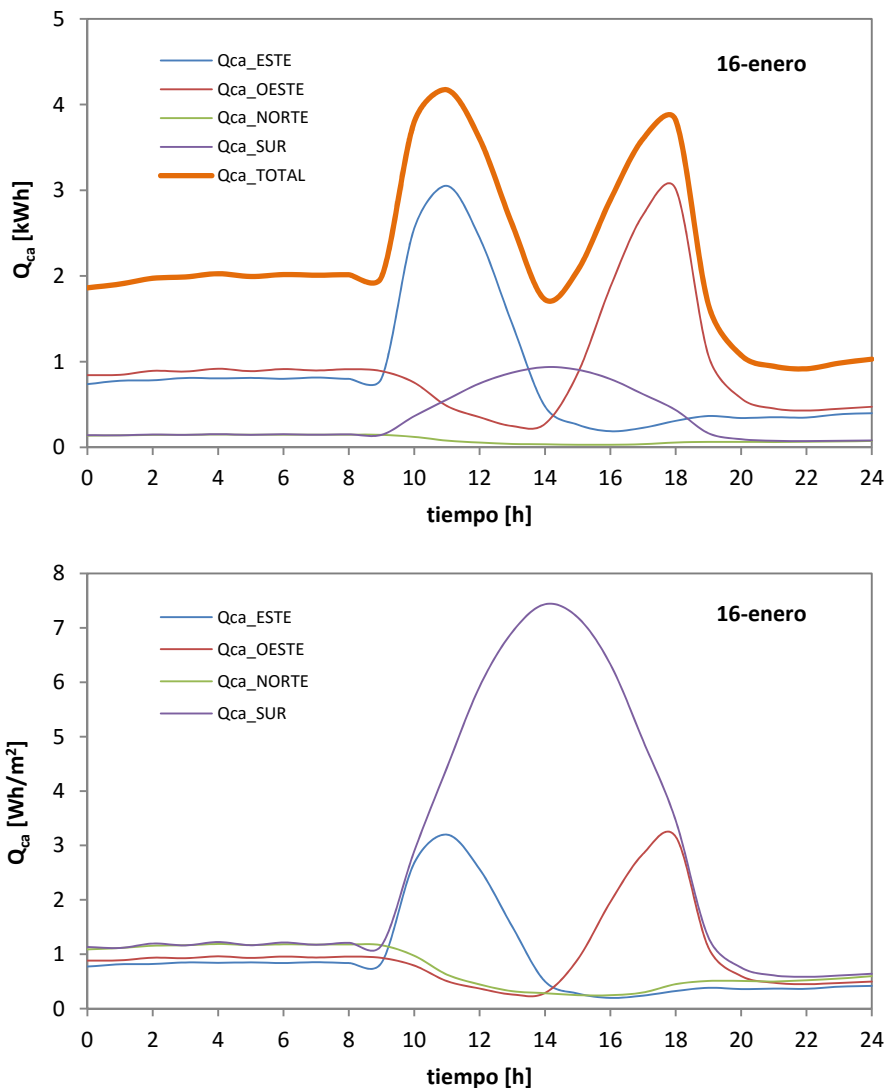


Figura 6.33 – Calor total absorbido en cada fachada del edificio, gráfica superior, y por unidad de superficie, gráfica inferior, en el día tipo

En cuanto al resto de parámetros de comportamiento de la fachada ventilada, en la Figura 6.32 se muestran los coeficientes de convección y las velocidades de aire en relación a la incidencia solar sobre superficie vertical, en cada una de las orientaciones. Como se obtiene en el estudio experimental de la probeta de fachada ventilada ligera, el proceso de convección dentro de la cámara ventilada está muy ligado al soleamiento de la hoja exterior, con un pequeño desfase temporal debido a la poca inercia de la hoja de cemento. Es de destacar el comportamiento de la fachada norte, en la que se produce un frenado del movimiento del aire durante las horas centrales del día. Esto se debe a que la incidencia solar en esta orientación es insuficiente para generar un salto eficiente entre las temperaturas de las superficies que conforman la cámara ventilada respecto a la temperatura del aire exterior, reduciéndose dicho salto durante este periodo de tiempo, y por tanto, anulándose el proceso de convección. Este proceso también se da durante las horas del mediodía para la fachada oeste, y durante las horas del atardecer para la fachada este. Una vez analizado el comportamiento de la fachada ventilada, y su repercusión en la demanda, el punto de mayor interés es cuantificar el calor absorbido por la cortina de aire y su posible aprovechamiento. Siguiendo con el análisis del día tipo, en la Figura 6.33 se muestra dicho calor para cada orientación. En la Tabla 6.18 se recogen los valores correspondientes. Las fachadas con mayor absorción son las este y oeste, debido a su mayor superficie. Pero si se comparan los valores por unidad de superficie se puede ver claramente la potencialidad de la orientación sur, con una captación tres veces superior al resto. Si se compara dicho calor absorbido respecto a la energía solar incidente sobre cada superficie se obtiene ratios del orden del 1%. Estos porcentajes no son puramente una eficiencia de captación solar, ya que parte del calor absorbido por la cortina de aire se debe a la pérdidas de la vivienda, como se puede ver en el resultado asociado a la fachada norte. Pero sí permite obtener un índice aproximado de aprovechamiento solar y como se ve, este índice es muy reducido. Esto se debe principalmente al movimiento por convección natural del aire dentro de la cortina ventilada, que aporta caudales pequeños, y a la propia configuración constructiva de la fachada.

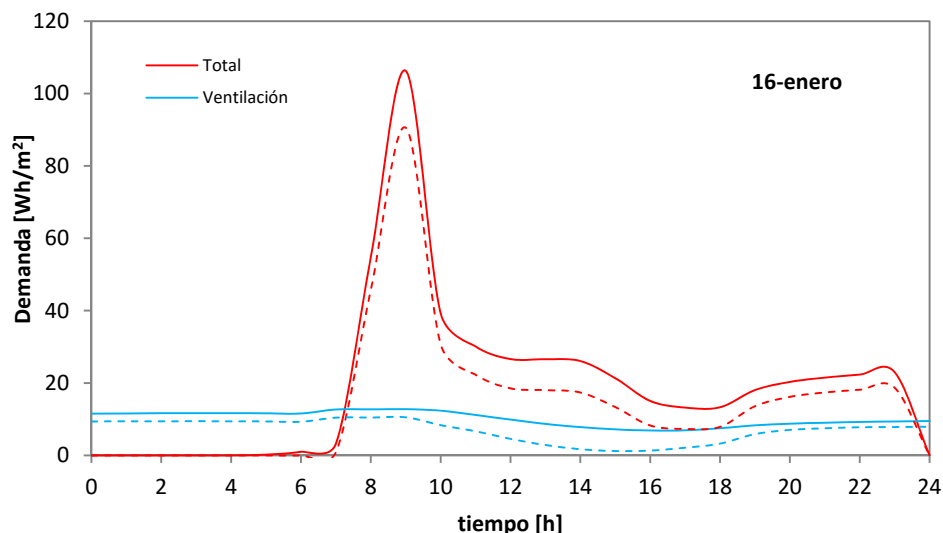


Figura 6.34 – Reducción de la demanda debido al aprovechamiento del calor de la cámara ventilada

Aún con una eficiencia de captación de energía solar muy baja, su aprovechamiento puede reducir de una forma interesante las demandas energéticas del edificio, como se puede ver en la Figura 6.34 en la que en línea continua se muestra la demanda del edificio con fachada ventilada original, y con aprovechamiento del calor de la cortina

de aire, línea discontinua, en el caso del día tipo para la vivienda de referencia. La demanda de la fachada ventilada original es de 482,1 [Wh/m²] de los cuales 252,1 [Wh/m²] corresponden a ventilación. Aprovechando la temperatura de la cámara de aire, si las renovaciones de aire de la vivienda se toman de la cámara ventilada y no directamente del ambiente exterior, la demanda de ventilación pasa a ser de 173,1[Wh/m²], lo que representa un 31,3% menor y la demanda total de 364,7 [Wh/m²], lo que representa un 24,3% de reducción. Respecto al edificio aislado con SATE la demanda de dicho día es de 409,5 [Wh/m²], lo que representa un 10,9% más que el edificio con aprovechamiento de la cortina de aire. Si se observa la Figura 6.35, en la que se muestra la comparativa de demandas, se ve que el aprovechamiento de la cortina de aire equilibra el aumento de pérdidas del sistema de fachada ventilada durante las horas nocturnas, y reduce la demanda durante las horas de incidencia solar. Además se dispone de una energía adicional de 306 [kWh] en el conjunto de la fachada ventilada, para un posible aprovechamiento en la generación de ACS o en la propia cobertura del sistema de climatización mediante un equipo de bomba de calor e intercambiador, por ejemplo.

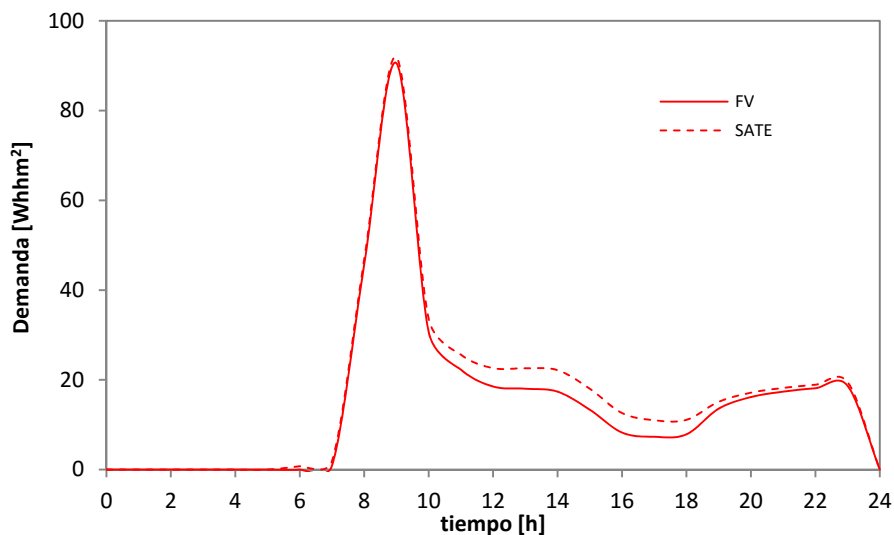


Figura 6.35 – Demanda de la fachada ventilada con aprovechamiento respecto al sistema de aislamiento directo

Una vez analizado el comportamiento del día tipo para la vivienda de referencia queda obtener los resultados para un año completo, y el total del edificio. En la Figura 6.36 se muestran los resultados obtenidos y la diferencia respecto al edificio con aislamiento directo. La nueva demanda es de 76,4 [MWh], lo que representa un 68,2% de reducción respecto al edificio sin rehabilitar y un 7,4% inferior al edificio con SATE, lo que representa una disminución 6,1 [MWh]. Si se analiza la gráfica de diferencias de demanda, se puede ver que hay periodos en los que el sistema SATE sigue presentando mejor comportamiento que la fachada ventilada con aprovechamiento, aunque en el conjunto del año siga actuando mejor la segunda. Estos periodos corresponden a días con baja incidencia solar y bajas temperaturas exteriores, de forma que el aprovechamiento de ventilación de la cortina de aire no compensa el aumento de pérdidas por la envolvente, debido a que el aumento de temperatura en la cortina de aire, respecto al ambiente exterior, no es muy representativo. Este resultado muestra el gran interés de un control sobre el movimiento del aire dentro de la cámara ventilada, respecto a un movimiento por convección natural. Con este control se puede aumentar la velocidad en los periodos de mejor comportamiento, lo que ampliaría la ganancia la cortina de aire aumentando el aprovechamiento solar, y la anulación de

dicho movimiento durante los periodos de baja incidencia solar, para obtener un comportamiento equivalente a un sistema estanco.

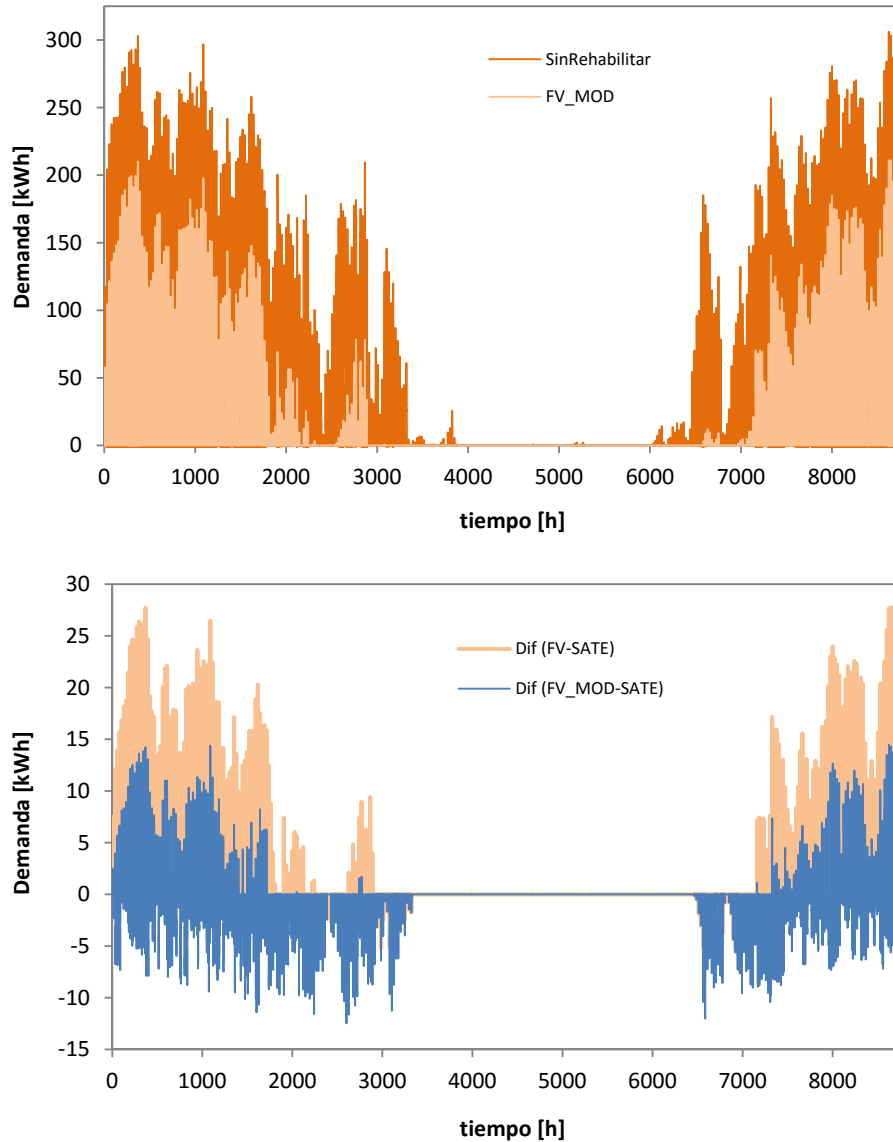


Figura 6.36 – Demanda de calefacción para el edificio con aprovechamiento del calor de la cámara de aire de la fachada ventilada

Este es un punto clave en los resultados del presente trabajo, que se desarrolla más en el apartado de futuras líneas de investigación, en el capítulo de conclusiones. Siguiendo la línea de desarrollo de los apartados anteriores, en la Tabla 6.19 se muestran los nuevos valores de demanda por unidades de superficie de cada vivienda. La demanda media del edificio pasa a ser de 36,7 [kWh/m²año], alejándose algo más del valor límite que impone la normativa, y que el edificio con aislamiento directo cumplía de forma ajustada. En la Tabla 6.20 se recogen los datos de la vivienda tipo; se puede ver el efecto del aprovechamiento de la temperatura en la cámara de aire para reducir la demanda de ventilación. Estos datos se comparan con los correspondientes a los equivalentes de la vivienda con aislamiento directo. En la Figura 6.37 se muestra de forma gráfica la comparativa de estos resultados.

		DEMANDAS ANUALES [kWh/m ²]							
		Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3			
		A	B	A	B	A	B		
		SUELO							
SUR	Piso 1	51.58	49.88	49.76	49.76	49.90	53.89	NORTE	
	Piso 2	32.87	31.24	31.10	31.10	31.26	35.45		
	Piso 3	31.75	29.11	29.05	29.05	29.21	33.43		
	Piso 4	30.97	29.25	29.19	29.19	29.36	33.61		
	Piso 5	34.61	32.45	32.29	32.29	32.48	37.03		
	Piso 6	42.99	42.42	42.27	42.27	42.44	46.27		
		CUBIERTA							

Tabla 6.19 –Demandas anuales de calefacción para el edificio con fachada ventilada y aprovechamiento

		DEMANDA [kWh/m ²]												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
SATE		9.3	6.7	2.9	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	5.8	9.4	34.8
FV_MOD		9.1	6.1	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	9.0	31.0

Tabla 6.20 –Demandas de calefacción en la vivienda tipo con aprovechamiento de la cámara de aire

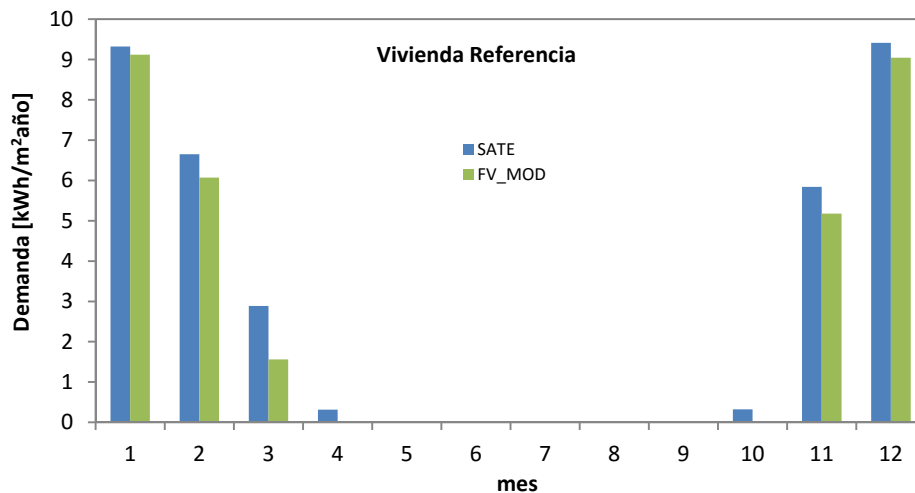


Figura 6.37 – Demanda mensual de calefacción de la vivienda de referencia con aprovechamiento de la fachada ventilada respecto a la vivienda con aislamiento SATE

Junto a la mejora en la ventilación de las viviendas mediante el aprovechamiento de la temperatura de la cámara ventilada, hay que tener en cuenta el calor absorbido por el caudal de aire circulante en la fachada. En la Figura 6.38 se muestra dicho calor para la superficie total del edificio, en cada mes. Las fachadas que más calor absorben son la este y oeste, debido a presentar mayor superficie por la geometría rectangular del edificio. Sin embargo, si se analizan los resultados del calor absorbido por unidad de superficie, se obtiene claramente la potencialidad de la fachada sur. En la Tabla 6.21 se recogen los datos numéricos indicados. Lo importante a tener en cuenta de los

resultados obtenidos es la cantidad de calor absorbido por la cortina de aire de la envolvente del edificio; en total este calor es de 70,4 [MWh], casi del mismo orden de la demanda de climatización. Y eso que la eficiencia promedio de captación respecto a la energía de radiación solar incidente es tan solo del 4%. En definitiva, la envolvente del edificio no deja de ser un gran captador solar, de baja eficiencia, pero con una gran superficie. Las fachadas ventiladas permiten trasladar este calor absorbido a un fluido manejable para su posterior aprovechamiento. De forma que, si se desarrolla la tecnología adecuada para extraer este calor del aire y emplearlo en la cobertura de las demandas del edificio, se puede alcanzar unas tasas de reducción de energía en la edificación muy importantes. Si en paralelo, se diseñan envolventes con una eficiencia de captación mayor, el objetivo final de edificios de consumo de energía nula estaría muy próximo.

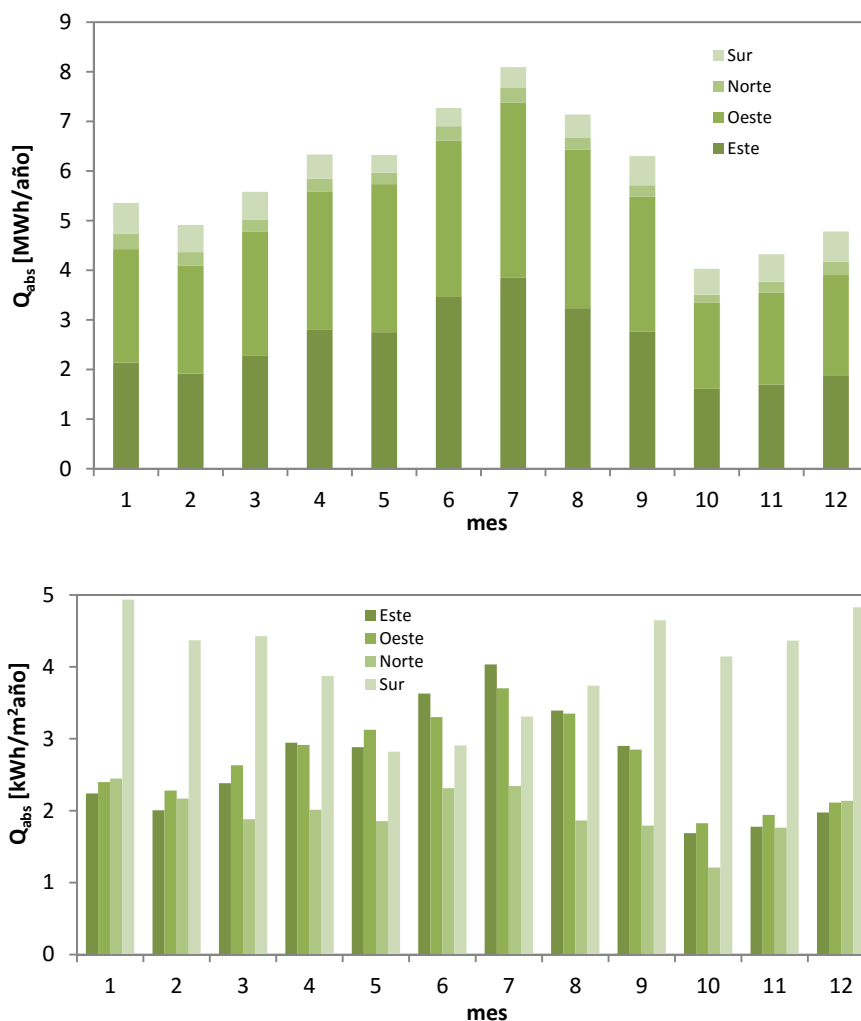


Figura 6.38 – Calor absorbido en la cortina de aire de la fachada ventilada en función de la orientación

Para demostrar con más contundencia la viabilidad de estos objetivos, aun partiendo de un sistema de fachada ventilada comercial, sin un diseño específico para el aprovechamiento solar, se obtiene un ahorro de energía importante respecto al edificio con aislamiento directo. Considerando un aprovechamiento de tan solo el 25%, un valor conservador, del calor absorbido por la cortina de aire, mediante el uso, por ejemplo, de un equipo de bomba de calor y sumándole la reducción de demanda por el

uso de la temperatura de la cámara de aire en la ventilación, se obtiene un edificio con una demanda total de 58,8 [MWh]. Ello representa una reducción de la demanda respecto al edificio con aislamiento directo del 28,8%, y una demanda media por vivienda de 28,2 [kWh/m²año]. En la Figura 6.39 se muestra la reducción de demanda que se ha comentado, para cada mes, descompuesta en la reducción de demanda asociada a la climatización, basada en el aprovechamiento de la tempera de la cámara de aire y la energía extraída de la cortina de aire.

		Q_{abs} [MWh]												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
ESTE		2.14	1.91	2.27	2.81	2.75	3.46	3.85	3.24	2.77	1.61	1.70	1.88	30.39
OESTE		2.29	2.17	2.51	2.78	2.98	3.15	3.53	3.20	2.72	1.74	1.85	2.02	30.94
NORTE		0.31	0.27	0.24	0.25	0.23	0.29	0.30	0.23	0.23	0.15	0.22	0.27	3.00
SUR		0.62	0.55	0.56	0.49	0.36	0.37	0.42	0.47	0.59	0.52	0.55	0.61	6.09

		Q_{abs} [kWh/m ²]												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media
ESTE		2.24	2.01	2.38	2.94	2.88	3.63	4.03	3.39	2.90	1.69	1.78	1.98	2.65
OESTE		2.40	2.28	2.63	2.91	3.13	3.30	3.70	3.35	2.85	1.83	1.94	2.11	2.70
NORTE		2.45	2.17	1.88	2.01	1.85	2.31	2.35	1.86	1.79	1.21	1.76	2.14	1.98
SUR		4.94	4.37	4.43	3.87	2.82	2.91	3.31	3.74	4.65	4.14	4.37	4.83	4.03

		ε_{Gv} [%]												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media
ESTE		6.1	4.9	3.2	3.0	2.5	2.7	2.8	2.7	3.0	2.7	4.6	5.7	3.7
OESTE		7.1	5.2	3.4	3.2	2.6	2.7	2.7	2.7	3.0	2.8	5.0	6.7	3.9
NORTE		15.5	9.6	5.7	4.7	3.3	3.5	3.6	3.9	4.8	4.4	10.0	14.9	7.0
SUR		5.4	4.5	3.8	4.3	3.3	3.6	3.7	3.5	3.9	3.7	5.1	6.2	4.3

Tabla 6.21 –Calor absorbido en la fachada ventilada según la orientación y eficiencia aproximada de captación de energía solar

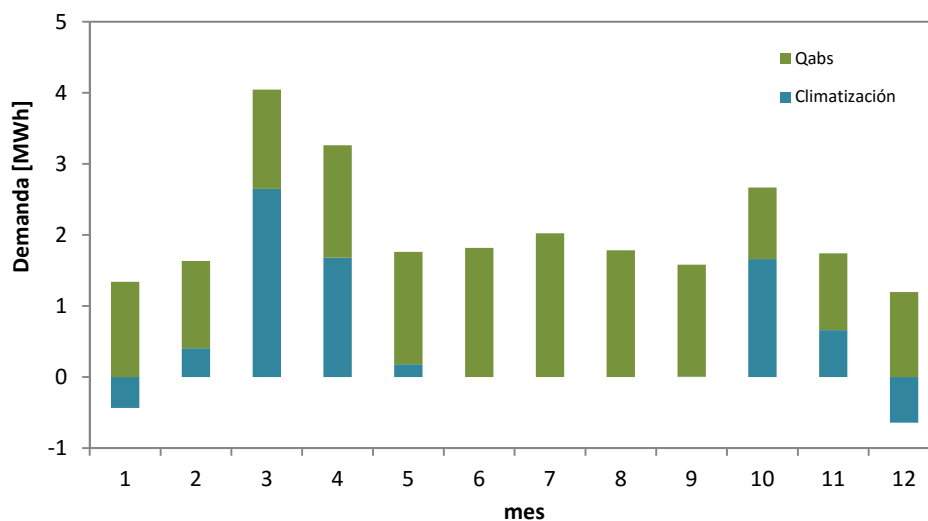


Figura 6.39 – Reducción de demanda mediante el aprovechamiento de la fachada ventilada respecto al sistema de aislamiento directo

No hay que olvidar que los resultados indicados se obtienen mediante una configuración constructiva convencional y sin modificar en gran medida los sistemas de climatización empleados usualmente en la edificación, por lo que su implantación podría ser directa. Para finalizar el estudio, queda por evaluar el efecto en la demanda de refrigeración de la fachada ventilada.

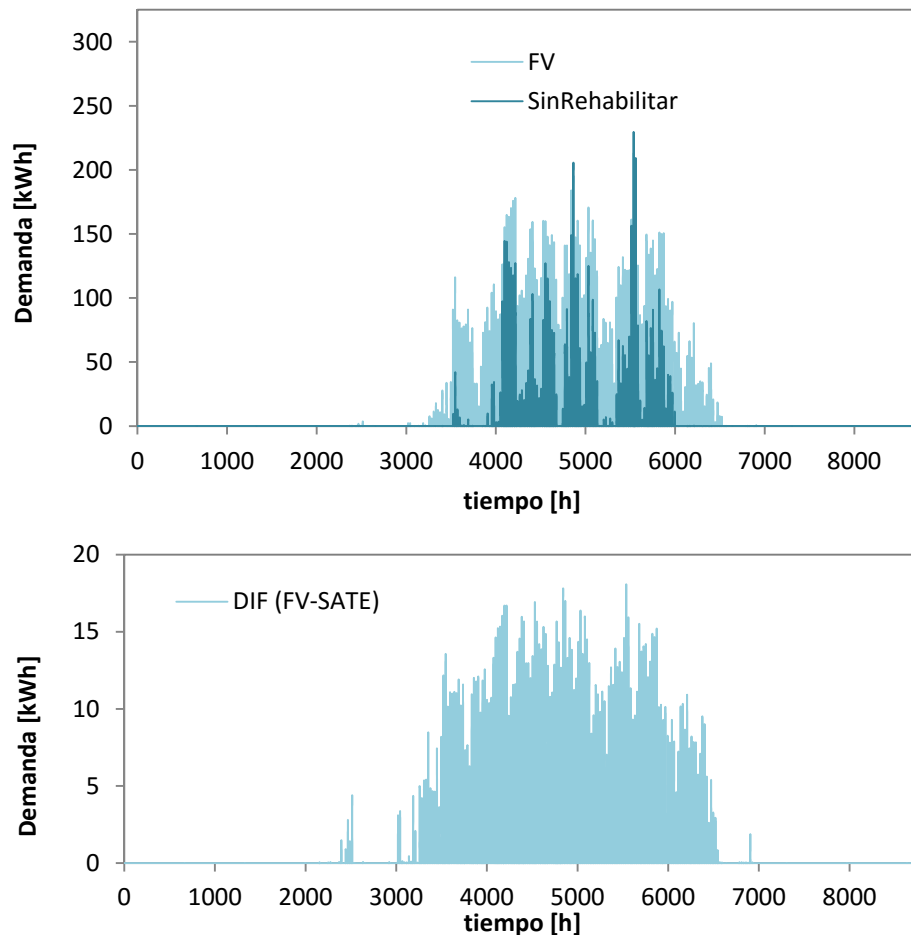


Figura 6.40 – Demanda de refrigeración en el edificio con fachada ventilada, y diferencia respecto a la demanda del edificio con aislamiento directo

La nueva demanda de refrigeración para el total del edificio es de 42,9 [MWh], lo que representa un 10,7% menor que en el caso del edificio con aislamiento directo, por lo que se nota el efecto refrigerante de la fachada ventilada. En este caso, ese calor evacuado sólo se puede emplear como fuente de calor para los sistemas del edificio, y la ventilación sería más adecuada realizarla directamente del ambiente exterior, ya que el aire de la cámara ventilada presenta mayor temperatura que el correspondiente al del ambiente. En la Figura 6.40 se muestra la demanda anual, que sigue siendo superior respecto a la obtenida en el edificio sin rehabilitar. En la Tabla 6.22 se recogen las demandas de refrigeración por vivienda. El valor medio es de 20,63 [kWh/m²año], y como sucede en el edificio con aislamiento directo, las mayores demandas se producen en las viviendas intermedias, aunque no hay grandes diferencias respecto a las viviendas con mayor proporción de fachada, incluso respecto a las que presentan orientación sur, como es el caso de la vivienda de referencia. En dicha vivienda la demanda de refrigeración asciende a 25,49 [kWh/m²año], lo que representa un 11,1% inferior a la que se obtiene con aislamiento directo y un 50,7% superior a la situación

original sin rehabilitar. En la Figura 6.41 se muestra la comparativa de demandas de refrigeración mensuales entre las tres configuraciones y en la Tabla 6.23 los datos exactos.

DEMANDAS ANUALES [kWh/m²]

		Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3			
		A	B	A	B	A	B		
SUELO									
SUR	Piso 1	2.76	2.83	2.81	2.81	2.83	1.55	NORTE	
	Piso 2	18.65	19.52	19.57	19.56	19.52	19.18		
	Piso 3	26.22	25.39	25.46	25.43	25.39	24.20		
	Piso 4	25.49	26.62	26.69	26.68	26.62	23.62		
	Piso 5	25.40	26.48	26.55	26.54	26.48	25.74		
	Piso 6	23.73	24.59	24.63	24.63	24.59	23.85		
CUBIERTA									

Tabla 6.22 –Demandas anuales de refrigeración para el edificio con fachada ventilada

DEMANDA [kWh/m²]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Sin Rehabilitar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.9	4.8	3.9	0.7	0.0	0.0	0.0	12.6
SATE	0.0	0.0	0.0	0.1	1.8	7.2	8.5	7.6	3.4	0.0	0.0	0.0	28.7
FV	0.0	0.0	0.0	0.1	1.5	6.5	7.7	6.9	2.9	0.0	0.0	0.0	25.5

Tabla 6.23 –Demandas mensuales de refrigeración en la vivienda tipo

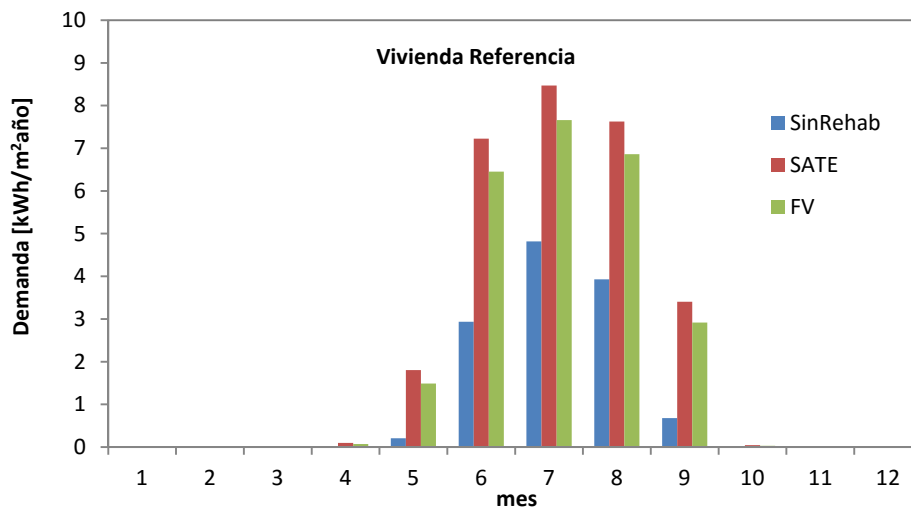


Figura 6.41 – Demanda mensual de refrigeración de la vivienda de referencia para las tres configuraciones de envolvente

Si se analiza la evolución de la demanda de refrigeración a lo largo del día de referencia seleccionado, Figura 6.42, se puede ver claramente el efecto refrigerante de la fachada ventilada.

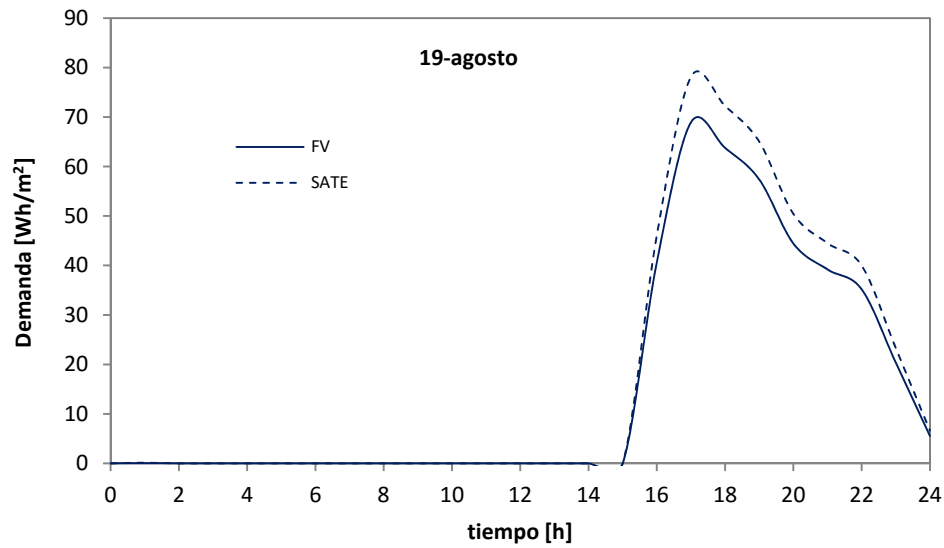
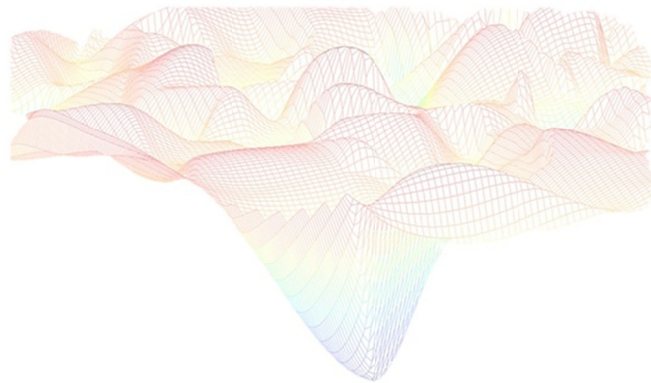


Figura 6.42 – Demanda de refrigeración a lo largo del día 19 de agosto para cada uno de los sistema de rehabilitación estudiados

Con este estudio, a escala de edificio, de los resultados obtenidos en el ensayo de la celda *PASLINK*, se finaliza los trabajos asociados a la presente tesis. Los desarrollos alcanzados en cada uno de las partes, y los resultados obtenidos en los datos y estudios asociados abren una serie de puertas futuros trabajos que continúen las líneas de investigación planteadas. Este análisis y la evaluación del cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente en los trabajos de esta tesis se definen con mayor detalle en el capítulo final de conclusiones.

Conclusiones





C.1 Aportaciones y conclusiones

Las dos partes en las que se divide el trabajo de tesis, puesta a punto de un método de ensayos fiable y estudio del comportamiento térmico de fachadas activas, se ha desarrollado completamente, alcanzando los objetivos principales planteados inicialmente. De forma complementaria, en cada objetivo parcial se realizan aportaciones particulares, de las cuales, las principales se definen a continuación:

Objetivo 1: Puesta a punto de una celda de ensayos *PASLINK*.

- Se ha conseguido trasladar toda la experiencia adquirida en las dos décadas de trabajos de la red *PASLINK* en el desarrollo de una celda con las condiciones óptimas de ensayo. Además, se recogen todos los trabajos de interés en un solo documento de referencia, a través del presente trabajo de tesis, que sirve de guía para la implantación de un equipo de estas características.



Figura C.1 – Estado actual de las celdas *PASLINK* del AT en las instalaciones del LCCE del Gobierno Vasco

- En los aspectos concretos de la celda, se han mejorado las condiciones de la sala de ensayos, reduciendo los puentes térmicos de la estructura y aumentado la estanqueidad de la sala de ensayos. Además, se ha mejorado el diseño de portamuestras en su propia configuración, así como en el mecaismo de sujeción en la estructura de la celda. Estas mejoras permiten mover dicho portamuestras a las instalaciones interiores de construcción de forma que se mejoran las condiciones de montaje y aumenta la precisión y fiabilidad de la colocación de los sensores de medida.

Objetivo 2: Calibración y análisis de incertidumbres de la celda.

- Se ha desarrollado un nuevo método de análisis de la medida del flujo de calor en las zonas de borde de la envolvente de la sala de ensayos. Este método consiste en registrar dicho flujo de calor a través de los sensores de las *multitiles* de forma dinámica. El procedimiento original consiste en la determinación de un factor estático de corrección. El método planteado permite corregir en tiempo real los factores de corrección, de forma que la medida del flujo intercambiado por la envolvente presenta una mayor precisión, reduciendo así la incertidumbre propia del ensayo.

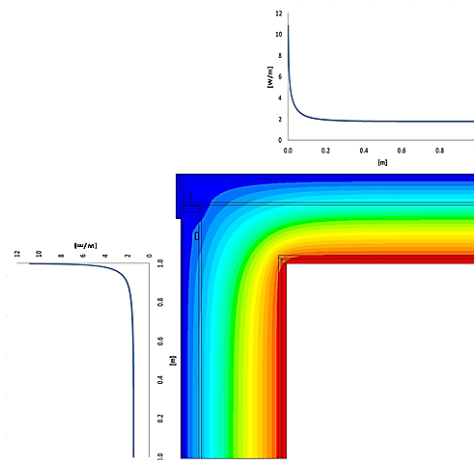


Figura C.2 – Estudio dinámico del flujo en las zonas de borde de la envolvente

- Se ha planteado un estudio de modelos de parámetros concentrados de la celda. Este estudio tiene una gran relevancia. Cuanto más sencillo es el modelo de la celda mayor es la precisión de las herramientas de identificación de los parámetros en la determinación de las propiedades del modelo del componente bajo estudio. Gracias a la configuración de celda, la instrumentación y metodología de medida, se ha conseguido disponer del modelo más simple de celda, lo que maximiza la potencialidad de ensayo.

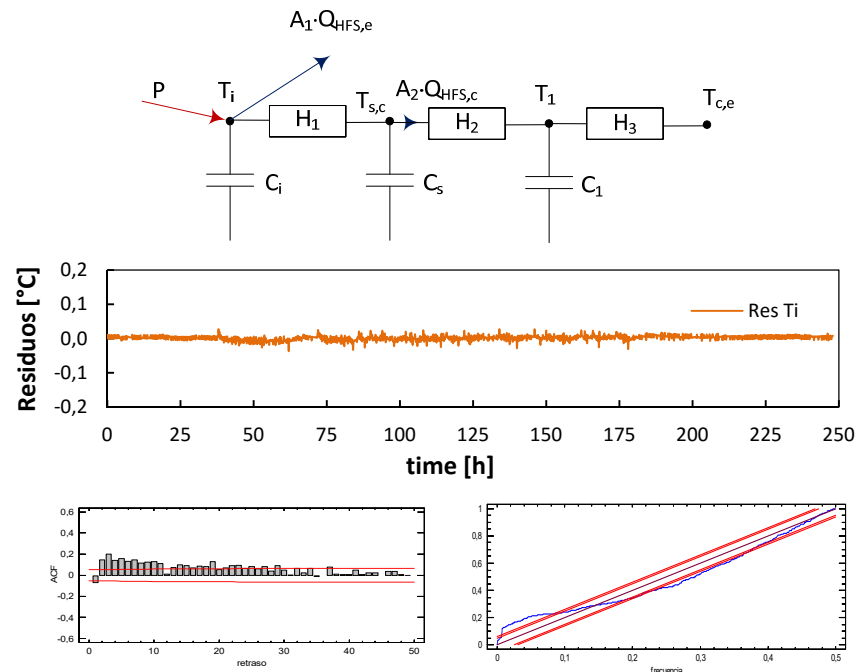


Figura C.3 – Modelo de parámetros concentrados de la celda PASLINK

- Además, mediante el estudio del muro de calibración se ha obtenido una incertidumbre de ensayo humbral de la metodología y, aun siendo el caso más desfavorable, esta incertidumbre se encuentra dentro del rango de incertidumbres de ensayos normalizados en condiciones de laboratorio. La

incertidumbre estimada incluye tanto el error de medida propio de la instrumentación, como el error del proceso de identificación de parámetros.

Objetivo 3: Ensayo de trazabilidad IQ-Test.

- Se ha realizado el ensayo de trazabilidad definido por la red *PASLINK*, con el objetivo de evaluar la calidad de los equipos en los distintos centros y estandarizar los resultados de la metodología de ensayo.

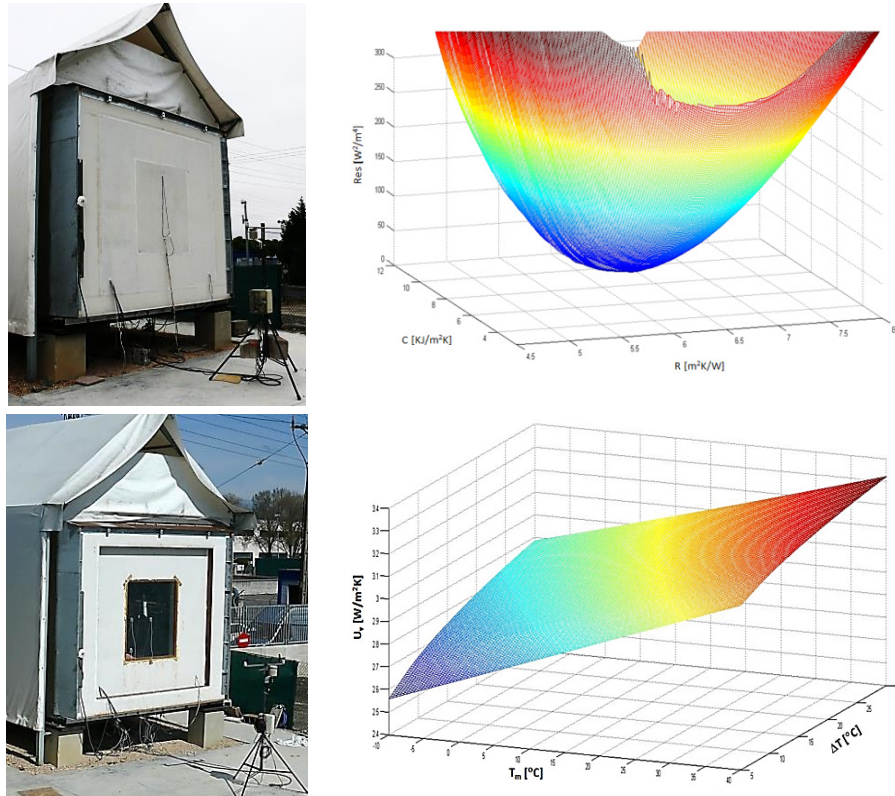


Figura C.4 – Componentes del ensayo IQ-Test

El ensayo de trazabilidad consiste en el estudio de dos componentes. El análisis del primer componente, un muro opaco, ha permitido aumentar la caracterización de los efectos de borde del sistema de portamuestras. El ensayo del segundo componente, una ventana de referencia, ha permitido disponer de experiencia imprescindible en la medida de la ganancia solar de sistema semitransparentes.

- Se ha ampliado el estudio disponible de los resultados del ensayo de trazabilidad. Se ha mejorado el análisis de los resultados de transmitancia del ensayo del componente de la ventana. Y por último, se ha podido comparar el estado de la celda *EGUSKI* respecto al resto de equipos de ensayo. Los resultados finales son positivos, el trabajo realizado en la puesta a punto de la celda del AT en el *LCCE* muestra unos resultados muy buenos dentro del análisis estadístico del interlaboratorio. El estudio realizado ha permitido demostrar el elevado grado de trazabilidad de los ensayos *PASLINK*.

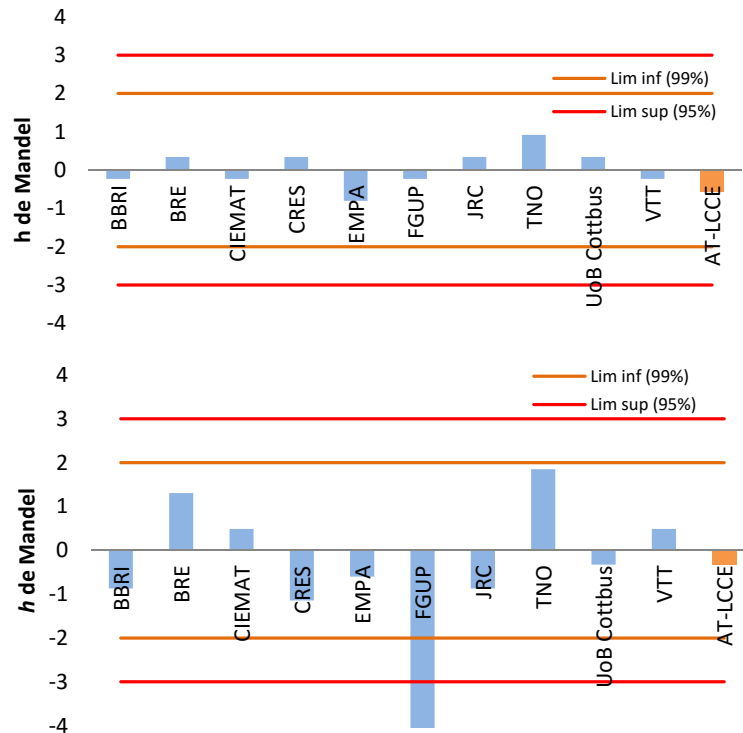


Figura C.5 – Resultados del primer y segundo componente del IQ-Test

Objetivo 4: Caracterización experimental de fachadas.

- Se han construido un total de cinco muestras de ensayo. Cabe destacar las probetas de fachada ventilada. La experiencia adquirida en el diseño de estas muestras es amplia y los sistemas de montaje definidos en el trabajo pueden ser una guía para otros centros que se enfrenten a la misma problemática. Es de especial interés el aspecto de la instrumentalización de las muestras. Se ha realizado un estudio detallado de los efectos de las zonas de entrada y salida en el movimiento convectivo dentro de la cámara ventilada, y se ha definido la instrumentación óptima para la adecuada caracterización experimental de dichos sistemas de fachada. Entre los principales resultados, por ejemplo, es la relevancia de la medida de las presiones para el ajuste posterior de CFD, o la adecuada distribución de las sondas de temperatura y velocidad de aire. El conocimiento base adquirido permite afrontar el ensayo de otros sistemas de fachada más complejos, con una base mínima de fiabilidad y calidad.
- Se ha generado una base de datos experimentales muy detallada y completamente definida. Uno de los principales escollos en la investigación actual es la falta de datos experimentales para la validación de los modelos de estudio. Uno de los intereses de este trabajo era la generación de dichos datos experimentales de alta fiabilidad. Además, estos datos van acompañados de la información complementaria necesaria para su correcto manejo. Partiendo de la definición de los sensores empleados en su toma, junto con sus incertidumbres y situación dentro de la muestra, como la frecuencia de muestreo y el procedimiento de medida. Los resultados obtenidos son de gran interés por sí mismo. Aunque el ensayo a escala de probeta presenta relativas limitaciones, el análisis de los datos aporta un gran conocimiento del

comportamiento real de las soluciones de fachada ventilada y de la respuesta de los materiales que las conforman respecto a las condiciones ambientales, como la radiación solar.

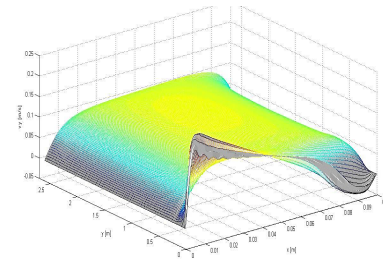
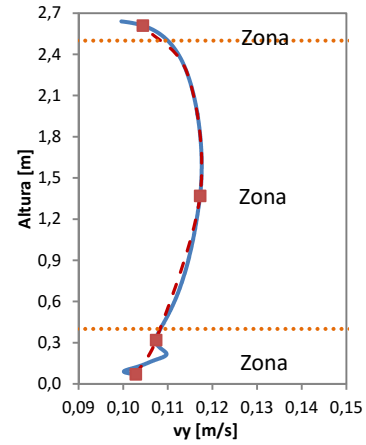


Figura C.6 – Construcción e instrumentación de las muestras

Por tanto, se considera que la base de datos experimentales generada presenta una calidad cinética, de referencia en el ámbito de la investigación en el campo de la energía en el sector de la edificación.

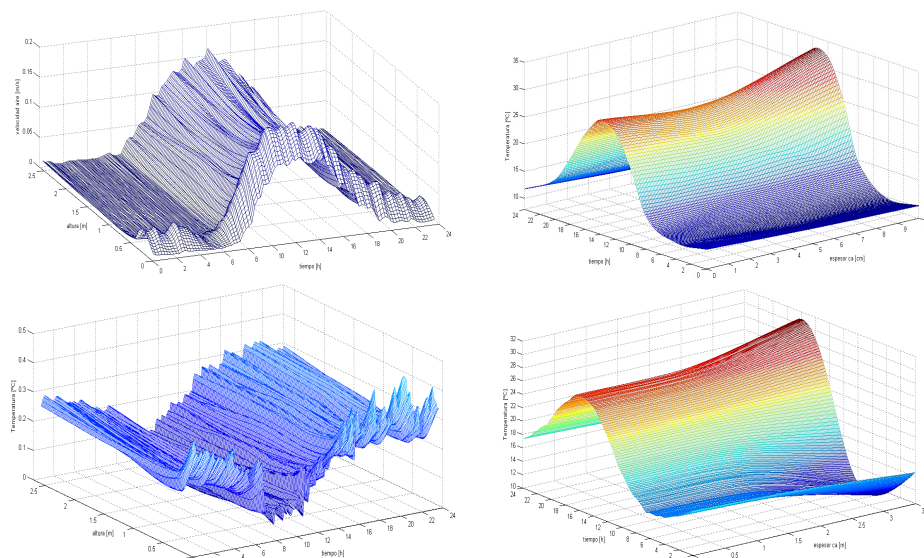


Figura C.7 – Datos experimentales de las fachadas ventiladas

Objetivo 5: Modelos matemáticos.

- El estudio de los muros base ha permitido analizar la potencialidad de las herramientas de identificación de parámetros en condiciones reales de ensayo, es decir, con muestras heterogéneas. Se ha podido cuantificar la incertidumbre de los ensayos reales sobre muestras convencionales. Además, la caracterización precisa de los sistemas de muro base permiten el análisis de los flujos intercambiados por cada superficie de la cámara ventilada en los estudios de las fachadas activas. Este punto es muy importante en el modelado de las mismas. La medida de dicho flujo entre superficies es uno de los puntos más complejos a resolver en el estudio de procesos de convección confinados. En la mayoría de los estudios realizados hasta el momento este problema se resolvía generando un flujo conocido. Pero esta solución implica una desviación de las condiciones de trabajo reales de las fachadas a escala de edificio. Gracias a la celda *PASLINK* y a la metodología de trabajo desarrollada en esta tesis, se ha podido resolver la medida de los flujos de calor entre superficies, lo que representa un aspecto innovador en la investigación de sistemas activos.

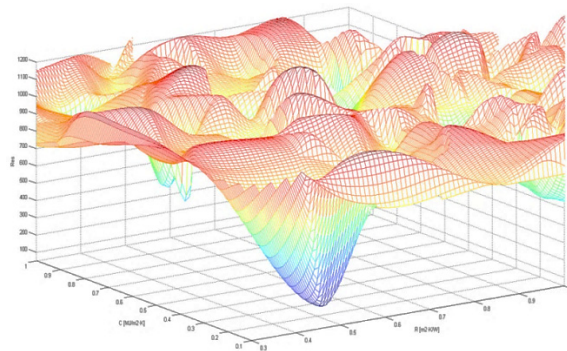


Figura C.8 – Identificación de parámetros en un muro de doble hoja

- Se han desarrollado modelos de *CFD* que permiten obtener más información sobre el campo de temperaturas y velocidades del aire dentro de la cámara ventilada.

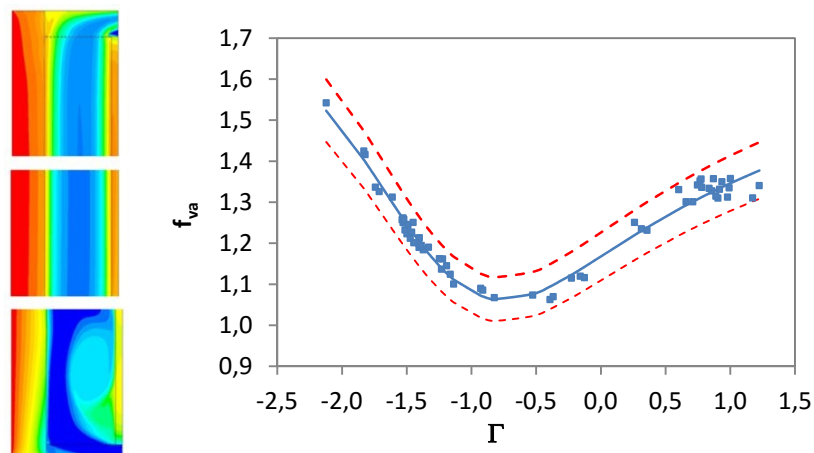


Figura C.9 – Modelo de *CFD* de la fachada ventilada

Los modelos se han contrastado con los datos experimentales, obteniéndose una experiencia importante en la definición de los parámetros de dichos modelos y en la configuración de las capas límites y efectos de las secciones de entrada. Se ha comprobado la importancia de la medida de las pérdidas de carga para el correcto ajuste de dichos modelos *CFD*. Todo el esfuerzo aplicado tiene como respuesta la obtención de unos coeficientes correctores de los datos puntuales medidos durante el ensayo, para el cálculo de las temperaturas y velocidades eficientes en la sección de la cámara ventilada. Este procedimiento sirve como base para el estudio de soluciones de fachada activas más complejas.

- Con los datos experimentales y el apoyo de los modelos de *CFD* se ha analizado la aplicación de los modelos estandar de convección a las fachadas ventiladas, obteniéndose desviaciones de más del 50% respecto a los datos experimentales. Por tanto, ha sido necesario desarrollar nuevos modelos que se ajusten a las condiciones reales. Este punto implica un aporte científico de relevancia.

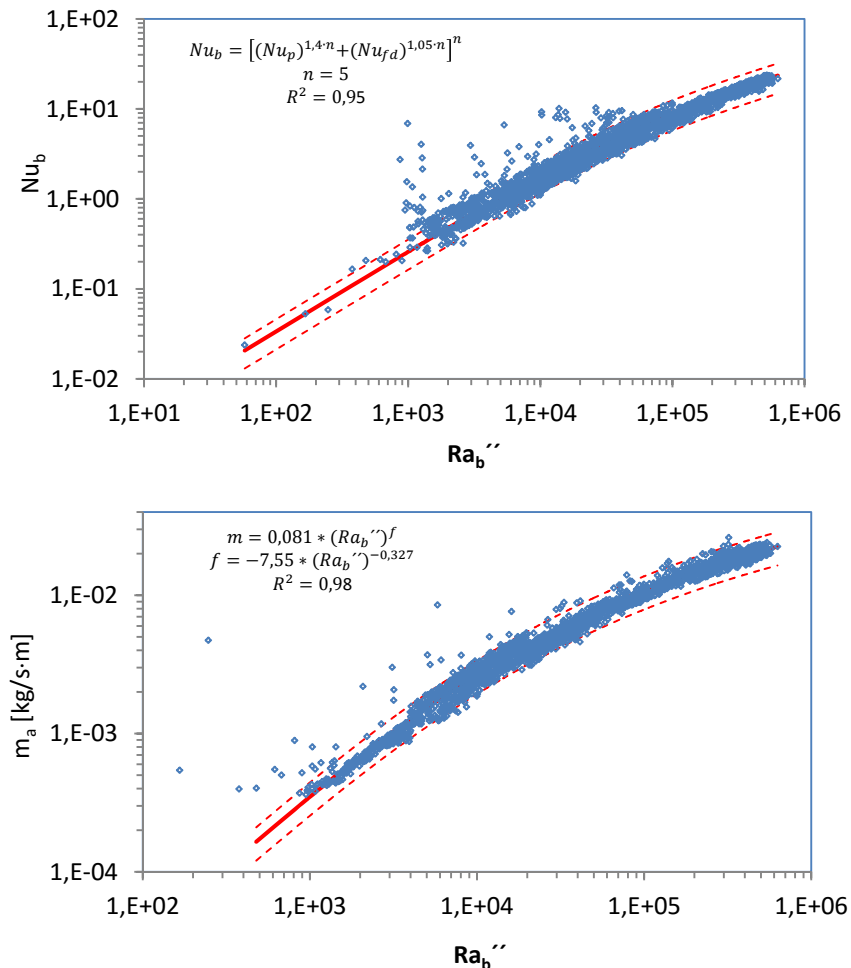


Figura C.10 – Modelo de convección de la fachada ventilada

- De forma complementaria a los modelos de convección, se ha desarrollado un modelo de parámetros concentrados que permite caracterizar el comportamiento medio de la fachada ventilada. Este modelo permite analizar

los diferentes mecanismos de transmisión de calor dentro de la cámara ventilada, lo que aporta un conocimiento más profundo del comportamiento energético de este tipo de envolventes y facilita el análisis de mejora y aprovechamiento energético, sin el esfuerzo que exigen los modelos más complejos que emplean herramientas de CFD.

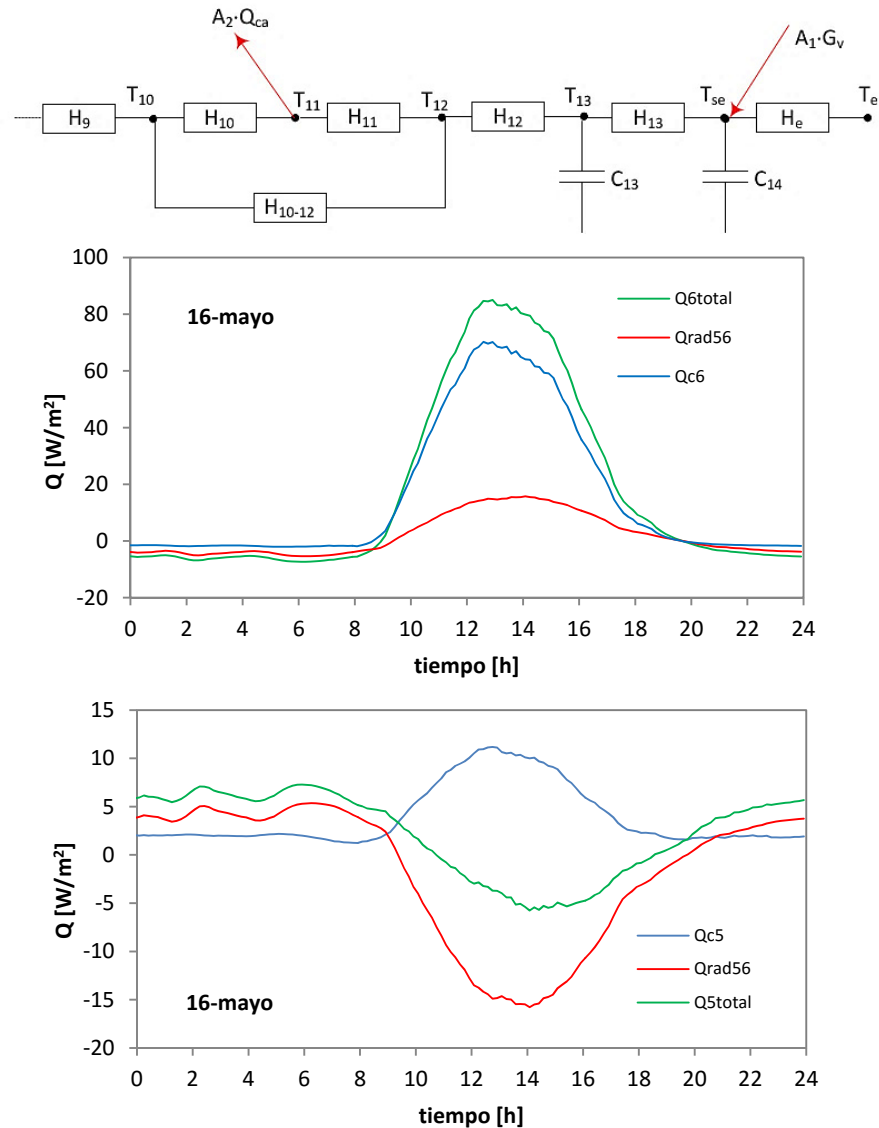


Figura C.11 – Modelo de parámetros concentrados de fachada ventilada

Objetivo 6: Modelo a escala de vivienda.

- Los modelos experimentales de convección desarrollados se han aplicado a la escala de edificio mediante la herramienta de simulación TRNSYS. Los parámetros del modelo se han integrado en una rutina de MATLAB, que alimenta a los datos del modelo de edificio. Mediante esta configuración se puede modelizar un amplio abanico de sistemas de fachadas activas, de forma que se pueda valorar su viabilidad energética y su potencial de aprovechamiento solar. Este alcance es un punto de gran importancia en la

fase de proyecto, ya que permite obtener resultados estimativos más fiables y próximos a los resultados finales del edificio en el ámbito de la reducción de demanda en viviendas.

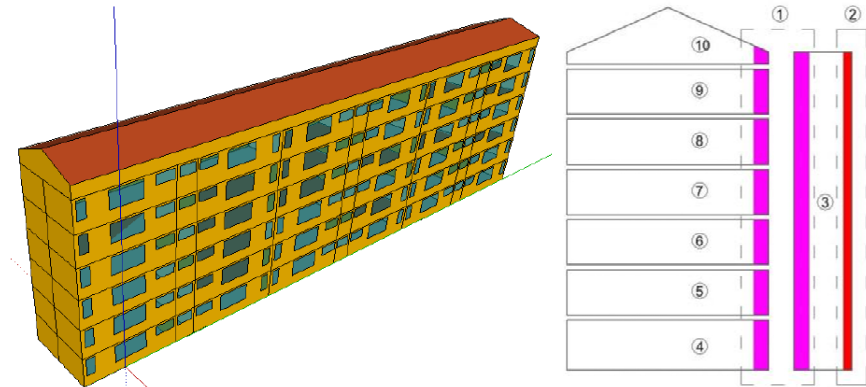


Figura C.12 – Modelo a escala de edificio de la fachada ventilada

- Se han obtenido unos resultados comparativos del comportamiento energético de sistema de fachada ventilada respecto a los sistemas de aislamiento directo. Dichos resultados demuestran sobre todo el potencial de captación de calor que se genera en la cortina de aire y que no se aprovecha de forma alguna en las configuraciones de sistemas de climatización en la actualidad. Esta energía absorbida por la piel exterior de la fachada ventilada aun siendo importante, presenta una eficiencia reducida de captación de energía solar incidente. Pero hay que tener en cuenta que se está analizando una solución constructiva convencional, sin diseño específico para el aprovechamiento solar. Si se mejora la hoja exterior y se emplean sistemas de aspiración en la cortina de aire, la envolvente podría ser un foco de calor interesante para la cobertura de la demanda energética en la edificación, que permitiría diseñar edificios de consumo casi nulo de forma viable. El estudio realizado con un sistema de fachada ventilada convencional abre la puerta y pone las bases adecuadas para realizar estudios de sistemas más complejos con fiabilidad e incertidumbres conocidas y controladas.

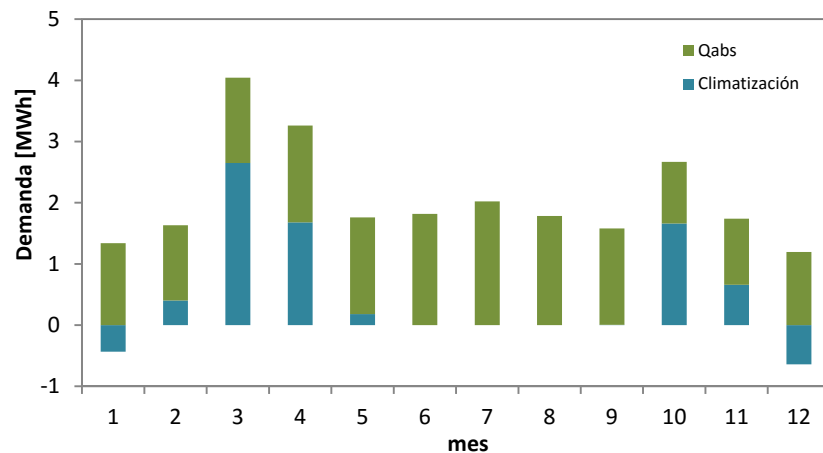


Figura C.13 – Aprovechamiento energético de la fachada ventilada

El trabajo realizado ha generado los pilares para el desarrollo de futuras líneas de investigación. Por un lado, el implantar un equipo de medida fiable y una metodología de ensayo controlada y trazable permite centrar los futuros esfuerzos en el propio análisis de soluciones constructivas. Además, la experiencia adquirida en el estudio de las muestras caracterizadas hasta el momento sienta las bases para la definición de las muestras de otros sistemas de fachadas activas, construcción de las probetas, número de sondas, tipología y ubicación de las mismas, etc... Además, se definen los modelos con los que trabajar directamente, por lo menos los correspondientes a la propia celda de ensayos, y los modelos de fachadas ventiladas empleados sirven como referencia para el punto de partida en el análisis específico de otras configuraciones. Por tanto, las líneas de investigación futuras que se plantean a partir de este trabajo son muchas y muy variadas.

C.2 Futuras líneas de investigación

Los próximos trabajos a desarrollar son el modelado de los dos sistemas de fachadas ensayados, la fachada natural pesada y la fachada forzada ligera, de la misma forma que se ha estudiado el sistema de fachada natural ligera. Y a su vez, ampliar el análisis energético a escala de edificio a más zonas climáticas. Además de los datos experimentales mostrados en el presente documento, al día de hoy, ya se han realizado ensayos sobre otras tipologías de fachadas activas. En la Figura C.14 se muestran las probetas de un muro trombe, imagen de la izquierda, y de una fachada fotovoltaica forzada, imagen de la derecha. El ensayo del muro trombe busca estudiar la eficiencia de esta configuración extensamente conocida para el aporte de calor en ventilación.



Figura C.14 – Otros ensayos de fachadas activas

Gracias al sistema acristalado las temperaturas que alcanza el aire en la cámara ventilada son superiores a las que se obtienen con hojas opacas. Además, la muestra ensayada presenta rejillas de entrada y salida de aire tanto en el paño interior como en la superficie exterior, de forma que se puede realizar todos los lazos posibles de ventilación. El ensayo permitirá disponer, no sólo de modelos matemáticos del comportamiento convectivo, sino que aportará información sobre el control óptimo del sistema de rejillas para su máximo aprovechamiento energético a lo largo de todo el año. En el caso del ensayo de la fachada con paneles fotovoltaicos, el objetivo del

análisis es la cuantificación de la potencialidad de emplearse la cortina de aire como un foco de calor para un sistema de climatización estilo bomba de calor. La hoja fotovoltaica tiene la particularidad que genera un calentamiento añadido por el proceso de producción eléctrica. Pero para su aplicación final es necesario disponer de información sobre caudales de aire disponibles y potencias de calor generadas, para poder diseñar las propiedades de los equipos asociados y los porcentajes de cobertura disponibles.



Figura C.15 – Edificio con envolventes activas

Todo el desarrollo y conocimiento obtenido en los diferentes ensayos se ha trasladado a un edificio ejemplo real que va a ser una referencia. En la actualidad se ha finalizado la construcción, por parte del Departamento de Vivienda del Gobierno Vasco, de un edificio de vivienda social ubicado en Portugalete, que presenta los sistemas analizados con el objetivo de obtener un estándar de consumo casi nulo. El edificio se muestra en la Figura C.15, y está formado por tres módulos, uno con una envolvente convencional pasiva, módulo de la izquierda, otro módulo con una fachada ventilada forzada de chapa, denominado *Solar Wall*, que actúa como foco térmico en el evaporador de una bomba de calor que suministra calefacción, módulo central, y el tercer módulo que dispone de una fachada trombe continua forzada, módulo de la

derecha, que se conecta al recuperador de calor del sistema de ventilación. El objetivo de esta configuración es poder comparar la relación coste-eficiencia de los sistemas activos respecto a las envolventes convencionales.

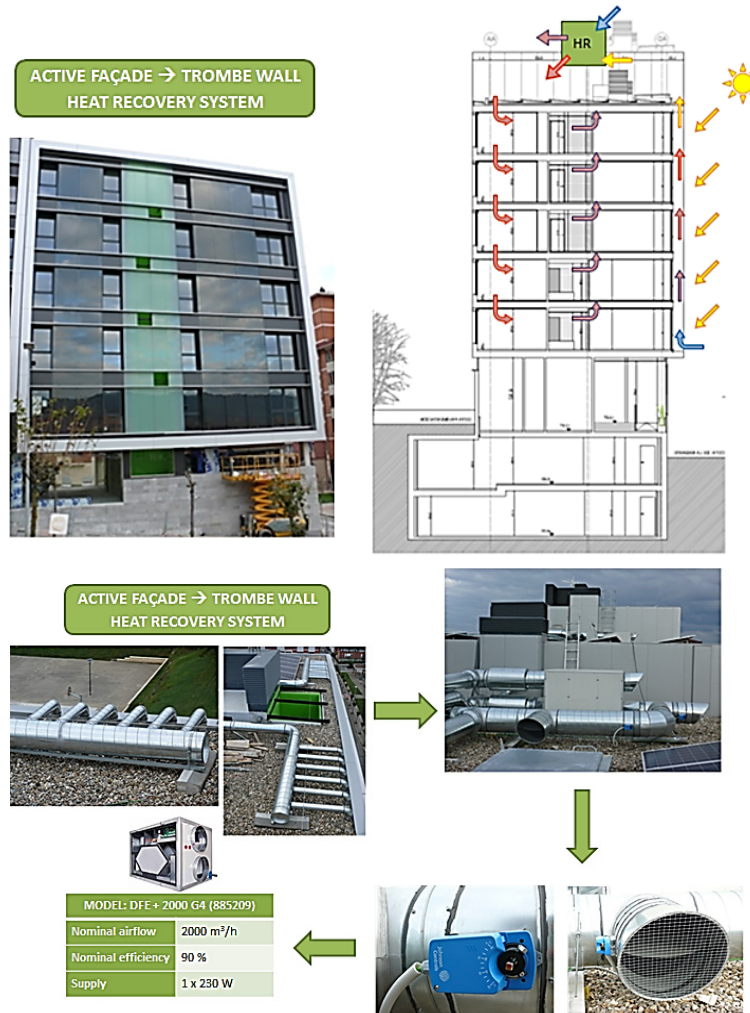


Figura C.16 – Configuración de la fachada trombe para aporte a ventilación

Todos los sistemas de envolventes activas del edificio se sitúan en la fachada sur-este. En la Figura C.16 se muestra el esquema de funcionamiento del muro trombe, el cual está formado por dos paños situados en el tercer módulo, como ya se ha comentado. Estos paños tienen una entrada de aire inferior y en la parte superior se conectan a unas tolvas que se juntan en un conducto único en el cual se sitúa la soplante de aspiración. Este conducto se conecta a la entrada de aire exterior del intercambiador de calor del sistema de ventilación de doble flujo. El sistema permite aplicar un *by-pass* en el intercambiador cuando la temperatura de entrada del aire sea próxima a los 18°C, de forma que se reducen los costes eléctricos de impulsión del sistema de ventilación y se obtiene directamente aire precalentado para la renovación del ambiente interior de las viviendas. En días con poca incidencia solar el recuperador de calor funcionará de forma convencional. Y en periodos estivales, cuando no se necesite el calor de la cortina de aire, se emplean dos compuertas servo-controladas que permiten evacuar el calor de la cortina del aire al ambiente exterior. En el caso del *Solar-Wall* la configuración es similar. En la Figura C.17 se muestran los dos paños de muro activo, el cual está formado por una chapa ondulada con *micro-perforaciones* a lo largo de toda

su superficie que actúan como entrada de aire a la cámara ventilada, en lugar de disponer de una única entrada inferior. La salida de ambos paños se conecta mediante tolvas a una soplante que desemboca en el evaporador de la bomba de calor de *aire-agua*, ver imágenes inferiores.



Figura C.17 – Configuración del Solar Wall para aporte de calefacción

Con esta configuración se espera subir la temperatura del foco térmico de forma que se reduzca el consumo de energía eléctrica en el sistema de compresión del circuito de refrigerante. Si a esto se le suma que el sistema de disipación de calor en viviendas está basado en suelo radiante, lo que permite trabajar con bajas temperaturas en el condensador, se busca alcanzar un COP de trabajo muy elevado respecto a los valores estandar. Junto a estos sistemas activos, el edificio dispone de generación eléctrica propia para autoconsumo mediante paneles fotovoltaicos y un motor alternativo de cogeneración, ver Figura C.18. El objetivo es autoproducir con el mayor porcentaje posible todos los consumos de energía eléctrica de operación, tanto de las instalaciones de climatización, bombas de impulsón, soplantes de ventilación, etc... como de los consumos de los servicios comunes, ascensores, iluminación, etc... Y aprovechando el conjunto de sistemas de generación y componentes activos se ha implantado un nuevo desarrollo que pretende producir calor gratuito para las. El edificio es de alquiler social, de forma que los inquilinos disponen de ingresos

reducidos, y en general, estas condiciones se traducen en que se ahorra en los costes de climatización, viviendo en ambientes fuera de las condiciones estándar de confort.



Figura C.18 – Sistemas de generación eléctrica

Para evitar esto, se busca introducir calor en las viviendas de forma centralizada, para atemperar el conjunto del edificio y mantener unas condiciones de temperatura medias próximas, o dentro del rango del confort, sin coste añadido para el gestor del edificio ni para los propios inquilinos. Para ello se aprovechará los momentos punta de radiación solar, horas centrales del día, cuando los consumos eléctricos del edificio son reducidos, y se produce una absorción de calor importante en el *Solar-Wall*, para impulsar la bomba de calor mediante la electricidad producida en las placas fotovoltaicas, inyectando calor en el suelo radiante de las viviendas.

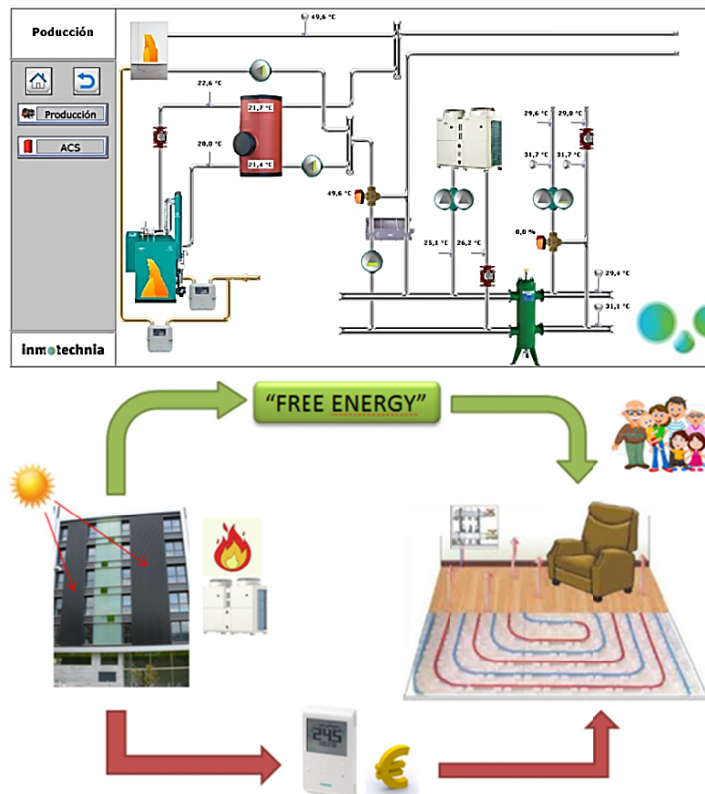


Figura C.19 – Concepto de calefacción renovable gratuita

El concepto en origen es correcto, pero el problema es que las condiciones óptimas para la generación gratuita de calor se producen en los momentos del día en los que esa inyección de calor no es necesaria. Sin embargo, el recalentado de mortero de suelo radiante sirve como depósito térmico de inercia para la acumulación de dicho calor en las viviendas sin que se produzca un sobrecalentamiento de las mismas durante las horas de actuación. De forma que se puede aprovechar ese calor acumulado durante las horas nocturnas, o en su caso, permite disponer de una temperatura base para aprovechar las horas de calefacción nocturnas con mayor eficiencia del usuario, al estar el suelo radiante en una temperatura de régimen. El concepto de calor gratuito se puede llevar a cabo gracias a un sistema de control del conjunto de instalaciones adecuado. Este sistema de control se ha desarrollado específicamente para este edificio y permitirá adelantarse a las condiciones óptimas de generación y comenzar a realizar la inyección de calor en el momento óptimo, ver Figura C.19. La fase de construcción de este edificio esta finalizada en el momento actual, y se espera que se ocupe por inquilinos a lo largo del año 2016, de forma que para finales del mismo y a más tardar, para el año 2017 se disponga de datos e información sobre el comportamiento de los sistemas activos diseñados y la potencialidad real del concepto de calor gratuito. Las expectativas sobre los resultados son muy altas y se espera que este edificio va a servir como referencia para el diseño de edificios de consumo casi nulo de energía a corto plazo.

Bibliografía



1. ASHRAE Handbook—Fundamentals. 2013.
2. COMPASS installation guide HFS tiles for the PASSYS test cells. G.P. van der linden, H.A.L. van dijk, A.J. lock, F. van der graaf, TNO. JOULE2 programme, brussels, 1995.
3. COMPASS measurement and data analysis procedures, H. A. L . van dijk, TNO building and construction research, F. tellez , CIEMAT. EC DG XII, brussels, december 1995.
4. COMPASS upgrading PASSYS test cells with a pseudo-adiabatic shell, construction manual. E. maldonado, universidade do porto. JOULE2 programme, brussels, 1995.
5. Development of the PASSYS test method, research report PASSYS subgroup test methodologies. ed. H.A.L. van dick, TNO building and construction research. CEC DG XII brussels, 1993. EUR 15114 EN.
6. ISO 9869:1994 - thermal insulation - building elements -in-situ measurements of thermal resistance and thermal transmittance. .
7. PASSYS test procedures. ed. H.A.L. van dijk, TNO. EC DG XII, brussels, 1993. EUR 15122 EN.
8. PASLINK calibration and component test procedures. final report. H. A. L. van dijk and G. P. van der linden, TNO building and construction research. february 1995.
9. PASLINK calibration manual. ed. B. saxhof, TIL-DTU lyngby. EC DG XII, brussels, 1995. (update of the PASSYS calibration manual. ed. B. stanzel, ITW university of stuttgart. EUR 15120 EN).
10. PASLINK EEIG: The grouping of outdoor test centres. final report of the PASLINK project. P. wouters, L. vandaele, BBRI. EC DG XII, brussels, 1995.
11. PASLINK FINAL ACTIVITY REPORT. P. wouters, L. vandaele, BBRI. EC DG XII, brussels, 1995.
12. PASSYS operations manual. ed. E. maldonado, FEUP. CEC DGXII, brussels, 1993. EUR 15119 EN.
13. The PASSYS test sites. status report autumn 1992. J.J. bloem, JRC. CEC DG XII, brussels, 1992. EUR 15118 EN.
14. EN 13119:2007 - curtain walling - terminology. .
15. JJ Bloem, editor. Proceedings of the international workshop on dynamic analysis methods applied to energy performance assessment of buildings. ; 2004; European Commission, Joint Research Centre.
16. EN 12664:2001 - thermal performance of building materials and products - determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - dry and moist products of medium and low thermal resistance. .
17. EN 12667:2001 - thermal performance of building materials and products - determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - products of high and medium thermal resistance. .
18. EN 1602:2013 - thermal insulating products for building applications - determination of the apparent density. .
19. ISO 10211:2007 - thermal bridges in building construction - heat flows and surface temperatures - detailed calculations. .

20. PASSYS test components descriptions. ed. A. guy, pilkington. EC DG XII, brussels, 1993. EUR 15121 EN.
21. ISO 6946:2007 - building components and building elements - thermal resistance and thermal transmittance - calculation method.
22. ISO/IEC guide 98-1:2009; uncertainty of measurement - part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement.
23. ISO/IEC guide 98-3:2008; uncertainty of measurement - part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
24. ISO/IEC guide 98-4:201;uncertainty of measurement - part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment.
25. ISO/IEC CD guide 98-5; evaluation of measurement data - part 5: Examples of uncertainty evaluation.
26. ISO 5725-1:1994; accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - part 1: General principles and definitions.
27. ISO 5725-2:1994; accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method.
28. ISO 5725-3:1994; accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method.
29. ISO 5725-4:1994; accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - part 4: Basic methods for the determination of the trueness of a standard measurement method
30. ISO 5725-5:1998; accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - part 5: Alternative methods for the determination of the precision of a standard measurement method.
31. ISO 5725-6:1994; accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - part 6: Use in practice of accuracy values.
32. EN 410:2011; glass in building - determination of luminous and solar characteristics of glazing.
33. EN ISO 12567-1:2010; thermal performance of windows and doors - determination of thermal transmittance by the hot-box method - part 1: Complete windows and doors.
34. EN 1745:2012 - masonry and masonry products - methods for determining thermal properties.
35. EN ISO 9972:2015 - thermal performance of buildings - determination of air permeability of buildings - fan pressurization method.
36. EN ISO 12569:2012 - thermal performance of buildings and materials - determination of specific airflow rate in buildings - tracer gas dilution method.
37. Abdellah B, Mebrouk R, Belkacem D, Salah C. Laminar natural convection in a vertical channel with a sinusoidal obstruction. J Appl Sci 2006;6(7):1426-36.

38. Abonyi J, Feil B, SpringerLink. Cluster analysis for data mining and system identification. Basel; Boston: Birkhäuser; 2007.
39. Akyildiz FT, Siginer DA, Vajravelu K, van Gorder RA. Natural convection heat transfer of a viscous fluid in a vertical porous channel. *J Eng Math* 2012;74(1):61-71.
40. Alcamo G, De Lucia M. A new test cell for the evaluation of thermo-physical performance of facades building components. *Int J Sustainable Energy* 2014;33(4):954-62.
41. Aleo F, Pennisi A, Scalia S, Simone F. Optical and energetic performances of an electrochromic window tested in a "PASSYS" cell. *Electrochim Acta* 2001 4/2;46(13-14):2243-9.
42. CFD analysis of heat transfer and fluid flow in flat plate natural convection solar air heater. 30th ISES biennial solar world congress 2011, SWC 2011; 2011.
43. Anelkovic AS, Gvozdenac-Uroevic B, Kljajic M, Ignjatovic MG. Experimental research of the thermal characteristics of a multi-storey naturally ventilated double skin facade. *Energy Build* 2015;86:766-81.
44. Andersen KK, Madsen H, Hansen LH. Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations. *Energy Build* 2000;31(1):13-24.
45. Andreozzi A, Buonomo B, Manca O. Thermal and fluid dynamic behaviors in symmetrical heated channel-chimney systems. *Int J Numer Methods Heat Fluid Flow* 2010;20(7):811-33.
46. Andreozzi A, Buonomo B, Manca O. Transient natural convection in vertical channels symmetrically heated at uniform heat flux. *Numer Heat Transfer Part A Appl* 2009;55(5):409-31.
47. Androutsopoulos A, Bloem JJ, van Dijk HAL, Baker PH. Comparison of user performance when applying system identification for assessment of the energy performance of building components. *Build Environ* 2008 2;43(2):189-96.
48. Aparicio-Fernández C, Vivancos J-, Ferrer-Gisbert P, Royo-Pastor R. Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation. *Appl Therm Eng* 2014;66(1-2):563-70.
49. Arce J, Jiménez MJ, Guzmán JD, Heras MR, Alvarez G, Xamán J. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. *Renewable Energy* 2009 12;34(12):2928-34.
50. Armando G-, Armando B-J, Christian V-, Rangel-Hernández VH, Belman-Flores JM. Analysis of the conjugate heat transfer in a multi-layer wall including an air layer. *Appl Therm Eng* 2010;30(6-7):599-604.
51. Athienitis AK, Bambara J, O'Neill B, Faille J. A prototype photovoltaic/thermal system integrated with transpired collector. *Sol Energy* 2011;85(1):139-53.
52. Auletta A, Manca O. Heat and fluid flow resulting from the chimney effect in a symmetrically heated vertical channel with adiabatic extensions. *Int J Therm Sci* 2002;41(12):1101-11.
53. Aung W. Fully developed laminar free convection between vertical plates heated asymmetrically. *Int J Heat Mass Transfer* 1972 August 1972;15(8):1577-80.

54. Aung W, Fletcher LS, Sernas V. Developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1972;15:2293-304.
55. Ayinde TF. Experimental investigation of turbulent natural convection flow in a converging channel. *Exp Therm Fluid Sci* 2008;32(6):1204-12.
56. Ayinde TF, Said SAM, Habib MA. Experimental investigation of turbulent natural convection flow in a channel. *Heat Mass Transfer* 2006;42(3):169-77.
57. Azevedo LFA, Sparrow EM. Natural convection in a vertical channel vented to the ambient through an aperture in the channel wall. *Int J Heat Mass Transf* 1986;29(6):819-30.
58. Azevedo LFA, Sparrow EM. Natural convection in open-ended inclined channels. *J Heat Transfer Trans ASME* 1985;107(4):893-901.
59. Babu V. *Fundamentals of incompressible fluid flow*. New Delhi, India: Ane Books Pvt. Ltd.; 2010. V.
60. Bacher P, Madsen H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy Build* 2011;43(7):1511-22.
61. Baker NV. *Passive solar test facility*. Energy Eonscious Design ud., London. Report prepared for the European Commission, Directorate General XII for Science Research and Development, Brussels. 1983.
62. Baker PH. Evaluation of round-robin testing using the PASLINK test facilities. *Build Environ* 2008 2;43(2):181-8.
63. Baker PH, McEvoy M. Test cell analysis of the use of a supply air window as a passive solar component. *Solar Energy* 2000;69(2):113-30.
64. Baker PH, Strachan P. IQ-TEST; final technical report; WP3 round robin test as feasibility study for standarization; PASLINK EEIG. 2003.
65. Baker PH, van Dijk HAL. PASLINK and dynamic outdoor testing of building components. *Build Environ* 2008 2;43(2):143-51.
66. Baker P. IQ-test—improving quality in testing and evaluation of solar and thermal characteristics of building components. *Energy Build* 2004 5;36(5):435-41.
67. Balocco C. A simple model to study ventilated facades energy performance. *Energy Build* 2002;34(5):469-75.
68. Barbu V. *Stabilization of navier-stokes flows*. London; New York: Springer; 2011.
69. Bar-Cohen A, Herman A. Experimental investigation of transient natural convection heat transfer in vertical enclosures (constant heating). *Letters in Heat and Mass Transfer* 1977 0;4(2):111-8.
70. On the validity of the boussinesq approximation in a developing mixed convection boundary layer. 1st international conference on thermal issues in emerging technologies, theory and applications; proceedings - ThETA1; 2007.

71. Baskaya S, Aktas MK, Onur N. Numerical simulation of the effects of plate separation and inclination on heat transfer in buoyancy driven open channels. *Heat Mass Transfer* 1999;35(4):273-80.
72. Bauwens G, Roels S. Co-heating test: A state-of-the-art. *Energy Build* 2014;82:163-72.
73. Beausoleil-Morrison I, et al . Demonstration of the new ESP-r and TRNSYS co-simulator for modelling solar buildings. *Energy Procedia* 2012;30:505-14.
74. Beckman WA, Broman L, Fiksel A, Klein SA, Lindberg E, Schuler M, Thornton J. TRNSYS the most complete solar energy system modeling and simulation software. *Renew Energy* 1994;5(1-4):486-8.
75. Bendat JS. Nonlinear system analysis and identification from random data. New York: Wiley; 1990.
76. Ben-Mansour R, Habib MA, Badr HM, Anwar S. Comparison of different turbulence models and flow boundary conditions in predicting turbulent natural convection in a vertical channel with isoflux plates. *Arab J Sci Eng* 2007;32(2 B):191-218.
77. Bhamjee M, Nurick A, Madyira DM. An experimentally validated mathematical and CFD model of a supply air window: Forced and natural flow. *Energy Build* 2013;57:289-301.
78. Billings SA. Nonlinear system identification :NARMAX methods in the time, frequency, and spatio-temporal domains. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Inc.; 2013.
79. Blanco JM, Arriaga P, Rojí E, Cuadrado J. Investigating the thermal behavior of double-skin perforated sheet façades: Part A: Model characterization and validation procedure. *Build Environ* 2014;82:50-62.
80. Blasco Lucas I, Hoesé L, Pontoriero D. Experimental study of passive systems thermal performance. *Renewable Energy* 2000 0;19(1-2):39-45.
81. Bloem JJ. Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment. *Build Environ* 2008 2;43(2):205-16.
82. Bloem JJ, Lodi C, Cipriano J, Chemisana D. An outdoor test reference environment for double skin applications of building integrated PhotoVoltaic systems. *Energy Build* 2012;50:63-73.
83. Bloem J. Report on support to CEN TC89/WG8. uptade of ISO 9869 to EN12494 "in-situ measurements of the thermal resistance and thermal transmittance". update march 2002.
84. Bloem J, editor . System identification competition. EUR 16359 EN ed. Luxembourg: EUROPEAN COMMISSION; 1996.
85. Bloem J, editor . System identification applied to building performance data. EUR 15885 EN ed. Luxembourg: EUROPEAN COMMISSION; 1994.
86. Bloem J, editor. Workshop on application of system identification in energy savings in building, 1994. EUR 15566.
87. Bodoia JR, Osterle JF. The development of free convection between heated vertical plates. *ASME J Heat Transfer* 1962;84:40-3.

88. Boudjemadi R, Maupu V, Laurence D, Le. Quéré P. Budgets of turbulent stresses and fluxes in a vertical slot natural convection flow at rayleigh $ra = 105$ and $5.4 \cdot 10^5$. *Int J Heat Fluid Flow* 1997 2;18(1):70-9.
89. Boyer F, Fabrie P. Mathematical tools for the study of the incompressible navier-stokes equations and related models. New York; London: Springer; 2013.
90. Brandl D, Mach T, Grobbauer M, Hochenauer C. Analysis of ventilation effects and the thermal behaviour of multifunctional façade elements with 3D CFD models. *Energy Build* 2014;85:305-20.
91. Brandl D, Mach T, Kaltenecker P, Sterrer R, Neururer C, Treberspurg M, Hochenauer C. CFD assessment of a solar honeycomb (SHC) façade element with integrated PV cells. *Solar Energy* 2015 8;118:155-74.
92. Brangeon B, Joubert P, Bastide A. Influence of the dynamic boundary conditions on natural convection in an asymmetrically heated channel. *Int J Therm Sci* 2015;95:64-72.
93. Numerical investigation of natural convection in an asymmetrically heated inclined channel-chimney systems importance of the choice of artificial inlet-outlet boundary conditions. *Proceedings of BS 2013: 13th conference of the international building performance simulation association*; 2013.
94. Brinkworth BJ. Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts. *Solar Energy* 2000;69(5):413-20.
95. Brinkworth BJ. A procedure for the routine calculation of laminar free and mixed convection in inclined ducts. *Int J Heat Fluid Flow* 2000 8;21(4):456-62.
96. Brinkworth BJ, Sandberg M. Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays. *Solar Energy* 2006 1;80(1):89-103.
97. Burch T, Rhodes T, Acharya S. Laminar natural convection between finitely conducting vertical plates. *Int J Heat Mass Transfer* 1985 6;28(6):1173-86.
98. Burek SAM, Habeb A. Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and trombe walls. *Energy Build* 2007 2;39(2):128-35.
99. Burlacu A, Ciocan V, Verdes M, Popovici GC, Balan MC, Tofan BA, Pastrav D. Experimental study for data validation regarding the flow movement in natural convection in an asymmetrical heated vertical channel. *Appl Mech Mater* 2014;659:313-8.
100. Burlacu A, Verdes M, Ciocan V, Popovici GC, Balan MC, Tofan BA, Pastrav D. Numerical study regarding the flow movement in natural convection in an asymmetrical heated vertical channel. *Appl Mech Mater* 2014;659:319-24.
101. Cadafalch J, Oliva A, van der Graaf G, Albets X. Natural convection in a large, inclined channel with asymmetric heating and surface radiation. *J Heat Transf* 2003;125(5):812-20.
102. Campaniço H, Hollmuller P, Soares PMM. Assessing energy savings in cooling demand of buildings using passive cooling systems based on ventilation. *Appl Energy* 2014;134:426-38.
103. Campo A, Manca O, Morrone B. Numerical investigation of the natural convection flows for low-prandtl fluids in vertical parallel-plates channels. *J Appl Mech Trans ASME* 2006;73(1):96-107.

104. Campo A, Manca O, Morrone B. Natural convection in vertical, parallel-plate channels with appended unheated entrances. *Int J Numer Methods Heat Fluid Flow* 2005; 15(2):183-204.
105. Features of natural convective air flows inside vertical parallel-plate channels subject to step heat fluxes: Insulated upstream and heated downstream. *American society of mechanical engineers, heat transfer division, (publication) HTD*; 1999.
106. Transient and steady state models for open-loop air-based BIPV/T systems. *ASHRAE transactions*; 2010.
107. Carbonari A, Naticchia B, D'Orazio M. Innovative evaporative cooling walls. *Eco-Efficient Mater for Mitigating Build Cool Needs: Des , Prop and Appl* 2015:215-40.
108. Carrilho da Graça G, Augusto A, Lerer MM. Solar powered net zero energy houses for southern europe: Feasibility study. *Sol Energy* 2012;86(1):634-46.
109. *Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1984.
110. Cebeci T, Cousteix J. *Modeling and computation of boundary-layer flows :Laminar, turbulent, and transitional boundary layers in incompressible flows*. Long Beach, Calif.: Horizons Pub.; 1999.
111. Celik H, Mobedi M. Visualization of heat flow in a vertical channel with fully developed mixed convection. *Int Commun Heat Mass Transf* 2012;39(8):1253-64.
112. Cesaratto PG, De Carli M, Marinetti S. Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation. *Energy Build* 2011 7;43(7):1792-801.
113. Chan H-, Zhu J, Riffat S. Solar facade for space cooling. *Energy Build* 2012;54:307-19.
114. A simulation and experimental study of the impact of passive and active façade systems on the energy performance of building perimeter zones. *ASHRAE transactions*; 2012. .
115. Chang TS, Lin TF. On the reversed flow and oscillating wake in an asymmetrically heated channel. *Int J Numer Methods Fluids* 1990;10(4):443-59.
116. Chen B, Hu J, Principe JC, Zhu Y. *System parameter identification :Information criteria and algorithms*. Fir ed. London, UK: Elsevier; 2013.
117. Chen H, Zhao W. *Recursive identification and parameter estimation*. Boca Raton; Taylor & Francis; 2014; 2014.
118. Chen Y-, Gao L-, Wang Y-, He W-, Guo X-. Experimental research and optimization of natural ventilation for VDSF in zones hot in summer and cold in winter. *Hunan Daxue Xuebao* 2015;42(5):120-5.
119. Chen ZD, Bandopadhyay P, Halldorsson J, Byrjalsen C, Heiselberg P, Li Y. An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. *Build Environ* 2003 7;38(7):893-906.
120. Cheng C-, Huang S-, Aung W. Numerical predictions of mixed convection and flow separation in a vertical duct with arbitrary cross section. *Numer Heat Transfer Part A Appl* 2002;41(5):491-514.

121. Cheng C-, Lin C-, Aung W. Predictions of developing flow with buoyancy-assisted flow separation in a vertical rectangular duct: Parabolic model versus elliptic model. *Numer Heat Transfer Part A Appl* 2000;37(6):567-86.
122. Cheng X, Müller U. Turbulent natural convection coupled with thermal radiation in large vertical channels with asymmetric heating. *Int J Heat Mass Transf* 1998;41(12):1681-92.
123. Chi C. Blind equalization and system identification :Batch processing algorithms, performance and applications. London: Springer; 2006. Chong-Yung Chi .
124. Eicker U, Fux V, Bauer U, Mei L, Infield D. Façades and summer performance of buildings. *Energy Build* 2008;40(4):600-11.
125. Chow TT, He W, Ji J. An experimental study of façade-integrated photovoltaic/water-heating system. *Appl Therm Eng* 2007 1;27(1):37-45.
126. Churchill SW, Chu HHS. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *Int J Heat Mass Transfer* 1975 November 1975;18(11):1323-9.
127. Cianfrini C, Corcione M, Habib E, Quintino A. Energy performance of a lightweight opaque ventilated façade integrated with the HVAC system using saturated exhaust indoor air. *Energy Build* 2012;50:26-34.
128. Cipriano J, Houzeaux G, Chemisana D, Lodi C, Martí-Herrero J. Numerical analysis of the most appropriate heat transfer correlations for free ventilated double skin photovoltaic façades. *Appl Therm Eng* 2013 8;57(1-2):57-68.
129. Cohen AB, Rohsenow WM. Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates. *Journal of Heat Transfer* 1984;106:116-23.
130. Dariusz H. Isothermal storage of solar energy in building construction. *Renewable Energy* 2010 4;35(4):788-96.
131. Das S. Functional fractional calculus for system identification and controls. Berlin; New York: Springer; 2008.
132. Dascalaki E, Santamouris M, Argiriou A, Helmis C, Asimakopoulos DN, Papadopoulos K, Soilemes A. Predicting single sided natural ventilation rates in buildings. *Solar Energy* 1995 11;55(5):327-41.
133. Dascalaki E, Santamouris M, Bruant M, Balaras CA, Bossaer A, Ducarme D, Wouters P. Modeling large openings with COMIS. *Energy Build* 1999 4;30(1):105-15.
134. Davies MG. Optimum design of resistance and capacitance elements in modelling a sinusoidally excited building wall. *Build Environ* 1983;18(1-2):19-37.
135. de Wit S, Augenbroe G. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy Build* 2002 10;34(9):951-8.
136. Desrayaud G, et al . Benchmark solutions for natural convection flows in vertical channels submitted to different open boundary conditions. *Int J Therm Sci* 2013;72:18-33.
137. Desrayaud G, Fichera A. Laminar natural convection in a vertical isothermal channel with symmetric surface-mounted rectangular ribs. *Int J Heat Fluid Flow* 2002;23(4):519-29.

138. Dewson T, Day B, Irving AD. Least squares parameter estimation of a reduced order thermal model of an experimental building. *Build Environ* 1993 4;28(2):127-37.
139. Dimoudi A, Androutsopoulos A, Lykoudis S. Experimental work on a linked, dynamic and ventilated, wall component. *Energy Build* 2004 5;36(5):443-53.
140. Domínguez-Muñoz F, Anderson B, Cejudo-López JM, Carrillo-Andrés A. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. *Energy Build* 2010 11;42(11):2159-68.
141. Elenbaas W. Heat dissipation of parallel plates by free convection. *Physica* 1942 January 1942;9(1):1-28.
142. Upgrading and calibration of two PASLINK test cells. evaluation through the "IQ-TEST" round-robin test. ; 11-12 October 2010; ; 2010.
143. Erlebacher G, Hussaini MY, Speziale CG, Zang TA. Toward the large-eddy simulation of compressible turbulent flows. *JOURNAL OF FLUID MECHANICS* 1992;238:155-85.
144. F. F. Local weather correlations and bias in building parameter estimates from energy-signature models. *Energy Build* 1992;19(2):113-23.
145. Fallahi A, Haghghat F, Elsadi H. Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass. *Energy Build* 2010;42(9):1499-509.
146. Favoino F, Goia F, Perino M, Serra V. Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional façade module. *Energy Build* 2014;68(PART B):647-59.
147. Feireisl E, Novotnou A. Singular limits in thermodynamics of viscous fluids. Basel: Birkhouser; 2009.
148. Ferziger JH, Peric M. Computational methods for fluid dynamics. 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2002. .
149. Fisher TS, Torrance KE. Experiments on chimney-enhanced free convection. *J Heat Transf* 1999;121(3):603-9.
150. Flamant g, Coenen S. IQ-TEST - comparison of properties of clear glass from different origins. division of building physics and indoor climate, BBRI. 2001.
151. Frédéric D, Fabien T, Sandrine S, Ruddy B. Two-dimension experimental study of the reverse flow in a free convection channel with active walls differentially heated. *Exp Therm Fluid Sci* 2013;47:150-7.
152. Friling N, Jiménez MJ, Bloem H, Madsen H. Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules. *Energy Build* 2009 10;41(10):1051-7.
153. Fu W-, Huang S-, Li C-. An investigation of unsteady flow reversal of natural convection in vertical parallel plates by the modified local one-dimensional inviscid relations method. *Int J Heat Mass Transf* 2015;86:124-38.
154. Fuliotto R, Cambuli F, Mandas N, Bacchin N, Manara G, Chen Q. Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building facade. *Energy Build* 2010;42(1):23-8.

155. Gan G. Numerical determination of adequate air gaps for building-integrated photovoltaics. *Solar Energy* 2009;83(8):1253-73.
156. Gan G, Riffat SB. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery. *Appl Therm Eng* 1998;18(12):1171-87.
157. Gan G. Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. *Energy Build* 2006 5;38(5):410-20.
158. Garnier H, Wang L. System identification, environmental modelling, and control system design. London: Springer; 2012.
159. Garnier H, Wang L, SpringerLink. Identification of continuous-time models from sampled data. London: Springer; 2008.
160. Ghiaasiaan SM. Convective heat and mass transfer. Cambridge; New York: Cambridge University Press; 2011.
161. Goia F, Haase M, Perino M. Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting simulations in a total energy perspective. *Appl Energy* 2013;108:515-27.
162. Gossard D, Lartigue B, Sambou V. Nusselt number correlations for laminar convection in three-dimensional air-filled cavities. *J Build Phys* 2012;35(4):327-37.
163. Gouda MM, Danaher S, Underwood CP. Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization. *Build Environ* 2002 12;37(12):1255-65.
164. Gratia E, De Herde A. Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin? *Energy Build* 2007;39(5):605-19.
165. Gratia E, De Herde A. Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin façade. *Energy Build* 2004;36(11):1139-52.
166. Gratia E, De Herde A. Optimal operation of a south double-skin facade. *Energy Build* 2004;36(1):41-60.
167. Gray DD, Giorgini A. The validity of the boussinesq approximation for liquids and gases. *Int J Heat Mass Transf* 1976;19(5):545-51.
168. Greblicki W, Pawlak M. Nonparametric system identification. New York: Cambridge University Press; 2008.
169. Gustavsen A, Thue JV. Numerical simulation of natural convection in three-dimensional cavities with a high vertical aspect ratio and a low horizontal aspect ratio. *J Build Phys* 2007;30(3):217-40.
170. Haber R, Keviczky L. Nonlinear system identification :Input-output modeling approach. Boston: Kluwer Academic Publishers; 1999.
171. Habib MA, Said SAM, Ahmed SA. Velocity characteristics of turbulent natural convection in convergent-plates vertical channels. *Int J Fluid Mech Res* 2002;29(2):158-78.
172. Hahne E, Pfluger R. Improvements on PASSYS test cells. *Solar Energy* 1996 0;58(4-6):239-46.

173. Computational fluid dynamics (CFD) analysis of building integrated photovoltaic thermal (BIPV/T) systems. ASME 2014 8th international conference on energy sustainability, ES 2014 collocated with the ASME 2014 12th international conference on fuel cell science, engineering and technology; 2014. .
174. Hajji A, Worek WM. Analysis of combined fully-developed natural convection heat and mass transfer between two inclined parallel plates. *Int J Heat Mass Transf* 1988;31(9):1933-40.
175. Hammarsten S, van Hattem D, Bloem H, Colombo R. Passive solar component testing with identification methods. *Solar Energy* 1988;41(1):5-13.
176. Han J, Lu L, Peng J, Yang H. Performance of ventilated double-sided PV façade compared with conventional clear glass façade. *Energy Build* 2013;56:204-9.
177. Hanby VI, Cook MJ, Infield DG, Ji Y, Loveday DL, Mei L, Holmes MJ. Nodal network and CFD simulation of airflow and heat transfer in double skin facades with blinds. *Build Serv Eng Res Technol* 2008;29(1):45-59.
178. Hawkins LE, Nelson DJ. A design methodology for vertical channel flow and heat transfer. *IEEE Trans Comp , Hybrids, Manufact Technol* 1992;15(5):761-70.
179. He Q, Wang LY, Yin G. System identification using regular and quantized observations. Dordrecht: Springer; 2013.
180. Henrik M. Time series analysis. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science; 2007. .
181. Higuera FJ, Ryazantsev YS. Natural convection flow due to a heat source in a vertical channel. *Int J Heat Mass Transf* 2002;45(10):2207-12.
182. Houzeaux G, Codina R. A Dirichlet/Neumann domain decomposition method for incompressible turbulent flows on overlapping subdomains. *Computational Fluids* 2003;33(5-6):771-82.
183. Hui C, Wang YQ, Wang B, Tao W, Zheng SL. Simulation and analysis of thermal performance of internal recycle double skin facades. *Appl Mech Mater* 2014;580-583:2415-20.
184. Ihara T, Gustavsen A, Jelle BP. Effect of facade components on energy efficiency in office buildings. *Appl Energy* 2015;158:422-32.
185. Infield D, Eicker U, Fux V, Mei L, Schumacher J. A simplified approach to thermal performance calculation for building integrated mechanically ventilated PV facades. *Build Environ* 2006 7;41(7):893-901.
186. Infield D, Mei L, Eicker U. Thermal performance estimation for ventilated PV facades. *Solar Energy* 2004 0;76(1-3):93-8.
187. Iyi D, Hasan R, Penlington R. Effect of emissivity on the heat and mass transfer of humid air in a cavity filled with solid obstacles. *Numer Heat Transfer Part A Appl* 2015;67(5):531-46.
188. Janssens A, Roels S. Full scale test facilities for hygrothermal analysis. R.U.Leuven, UGent ed. INIVE; 2011. Workshop, March 30-31 2011, Brussels.
189. Jiji LM, SpringerLink. Heat convection. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; 2009.

190. Jiménez MJ, Heras MR. Application of multi-output ARX models for estimation of the U and g values of building components in outdoor testing. *Solar Energy* 2005 9;79(3):302-10.
191. Jiménez MJ, Madsen H. Models for describing the thermal characteristics of building components. *Build Environ* 2008 2;43(2):152-62.
192. Jiménez MJ, Madsen H, Andersen KK. Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB. *Build Environ* 2008 2;43(2):170-80.
193. Jiménez MJ, Madsen H, Bloem JJ, Dammann B. Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules. *Energy Build* 2008;40(2):157-67.
194. Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value. *Build Environ* 2009 2;44(2):361-7.
195. Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. *Solar Energy* 2008 7;82(7):573-87.
196. Jiru TE, Taob Y-, Haghghat F. Airflow and heat transfer in double skin facades. *Energy Build* 2011;43(10):2760-6.
197. Joe J, Choi W, Kwak Y, Huh J-. Optimal design of a multi-story double skin facade. *Energy Build* 2014;76:143-50.
198. Joe J, Choi W, Kwon H, Huh J-. Load characteristics and operation strategies of building integrated with multi-story double skin facade. *Energy Build* 2013;60:185-98.
199. John L. Test cells: Do we need them? *Build Environ* 1993 4;28(2):221-8.
200. Jones AT, Ingham DB. Combined convection flow in a vertical duct with wall temperatures that vary linearly with depth. *Int J Heat Fluid Flow* 1993;14(1):37-47.
201. Joshi HM. Transient effects in natural convection cooling of vertical parallel plates. *Int Commun Heat Mass Transf* 1988;15(2):227-38.
202. Kalema T, Haapala T. Effect of interior heat transfer coefficients on thermal dynamics and energy consumption. *Energy Build* 1995;22(2):101-13.
203. Katunský D, Zozulák M, Vertal M, imicek J. Experimentally measured boundary and initial conditions for simulations. *Adv Mater Res* 2014;1041:293-6.
204. Keesman KJ. System identification. London; New York: Springer; 2011.
205. Kelkar KM, Choudhury D. Numerical prediction of periodically fully developed natural convection in a vertical channel with surface mounted heat generating blocks. *Int J Heat Mass Transf* 1993;36(5):1133-45.
206. Kettleborough CF. Transient laminar free convection between heated vertical plates including entrance effects. *Int J Heat Mass Transfer* 1972;15:883-96.
207. Khanal R, Lei C. An experimental investigation of an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation. *Sol Energy* 2014;107:461-74.

208. Khanal R, Lei C. Flow reversal effects on buoyancy induced air flow in a solar chimney. *Sol Energy* 2012;86(9):2783-94.
209. Kim D-, Park C-. Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus. *Energy Build* 2011;43(12):3635-45.
210. Kim G, Schaefer L, Kim JT. Development of a double-skin façade for sustainable renovation of old residential buildings. *Indoor Built Environ* 2013;22(1):180-90.
211. Kim SH, Anand NK, Aung W. Effect of wall conduction on free convection between asymmetrically heated vertical plates: Uniform wall heat flux. *Int J Heat Mass Transf* 1990;33(5):1013-23.
212. Kim Y-, Kim S-, Shin S-, Sohn J-. Contribution of natural ventilation in a double skin envelope to heating load reduction in winter. *Build Environ* 2009;44(11):2236-44.
213. Kim Y-, Lee J-, Kim S-, Kim S. Effects of double skin envelopes on natural ventilation and heating loads in office buildings. *Energy Build* 2011;43(9):2118-26.
214. Kiselev SP, Vorozhtsov EV, Fomin VM. Foundations of fluid mechanics with applications. 1st ed. Springer Science+Business Media New York: Birkhäuser Basel; 1999. .
215. Knezevic DJ, Nguyen N-, Patera AT. Reduced basis approximation and a posteriori error estimation for the parametrized unsteady boussinesq equations. *Math Models Methods Appl Sci* 2011;21(7):1415-42.
216. Kristensen NL, Madsen H, Jørgensen SB. Parameter estimation in stochastic grey-box models. *Automatica* 2004;40(2):225-37.
217. Kristensen NR, Madsen H. Continuous time stochastic modelling. CTSM 2.3—user's guide. technical university of denmark, 2003. .
218. Kristensen NR, Madsen H, Jørgensen SB. A method for systematic improvement of stochastic grey-box models. *Comput Chem Eng* 2004;28(8):1431-49.
219. Kristensen NR, Madsen H, Jørgensen SB. Parameter estimation in stochastic grey-box models. *Automatica* 2004 2;40(2):225-37.
220. Kuznik F, Catalina T, Gauzere L, Woloszyn M, Roux J-. Numerical modelling of combined heat transfers in a double skin faade - full-scale laboratory experiment validation. *Appl Therm Eng* 2011;31(14-15):3043-54.
221. Kwak D, Kiris C. Computation of viscous incompressible flows. Dordrecht; New York: Springer; 2011.
222. Kwak Y, Huh J, Jang C. Development of a model predictive control framework through real-time building energy management system data. *Appl Energy* 2015 10/1;155:1-13.
223. Labat M, Woloszyn M, Garnier G, Rusaouen G, Roux JJ. Impact of direct solar irradiance on heat transfer behind an open-jointed ventilated cladding: Experimental and numerical investigations. *Sol Energy* 2012;86(9):2549-60.
224. Lakkis I, Moukalled F. Natural-convection heat transfer in channels with isothermally heated convex surfaces. *Numer Heat Transfer Part A Appl* 2008;53(11):1176-94.

225. Lamnatou C, Mondol JD, Chemisana D, Maurer C. Modelling and simulation of building-integrated solar thermal systems: Behaviour of the system. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2015;45:36-51.
226. Lappa M. *Thermal convection :Patterns, evolution and stability*. Chichester, UK: Wiley; 2010.
227. Lau GE, Sanvicente E, Yeoh GH, Timchenko V, Fossa M, Ménéz C, Giroux-Julien S. Modelling of natural convection in vertical and tilted photovoltaic applications. *Energy Build* 2012;55:810-22.
228. Lau GE, Yeoh GH, Timchenko V, Reizes JA. Numerical investigation of passive cooling in open vertical channels. *Appl Therm Eng* 2012 6;39:121-31.
229. Lau GE, Yeoh GH, Timchenko V, Reizes JA. Large-eddy simulation of turbulent natural convection in vertical parallel-plate channels. *Numer Heat Transfer Part B Fundam* 2011;59(4):259-87.
230. Leal V, Maldonado E. The role of the PASLINK test cell in the modelling and integrated simulation of an innovative window. *Build Environ* 2008 2;43(2):217-27.
231. Leftheriotis G, Yianoulis P. Thermal properties of building materials evaluated by a dynamic simulation of a test cell. *Solar Energy* 2000;69(4):295-304.
232. Li D, Liu G, Liao S. Solar potential in urban residential buildings. *Sol Energy* 2015;111:225-35.
233. Li N, Yang Z, Becerik-Gerber B, Tang C, Chen N. Why is the reliability of building simulation limited as a tool for evaluating energy conservation measures? *Appl Energy* 2015 12/1;159:196-205.
234. Li R, Bousetta M, Chénier E, Lauriat G. Effect of surface radiation on natural convective flows and onset of flow reversal in asymmetrically heated vertical channels. *Int J Therm Sci* 2013;65:9-27.
235. Li R, Dai Y, Wang R. Experimental investigation and simulation analysis of the thermal performance of a balcony wall integrated solar water heating unit. *Renew Energy* 2015;75:115-22.
236. Li R, Dai YJ, Wang RZ. Experimental and theoretical analysis on thermal performance of solar thermal curtain wall in building envelope. *Energy Build* 2015;87:324-34.
237. Li S, Joe J, Hu J, Karava P. System identification and model-predictive control of office buildings with integrated photovoltaic-thermal collectors, radiant floor heating and active thermal storage. *Solar Energy* 2015 3;113:139-57.
238. Liao L, Athienitis AK, Candanedo L, Park K-, Poissant Y, Collins M. Numerical and experimental study of heat transfer in a BIPV-thermal system. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2007;129(4):423-30.
239. Lin JT, Armaly BF, Chen TS. Mixed convection in buoyancy-assisting, vertical backward-facing step flows. *Int J Heat Mass Transf* 1990;33(10):2121-32.
240. Experimental study of natural convection in an asymmetrically heated inclined channel with radiation exchange. *Proceedings of the ASME summer heat transfer conference*; 2003. Cited By :1.

241. Liu Y, Lei C, Patterson JC. Plume separation from an adiabatic horizontal thin fin placed at different heights on the sidewall of a differentially heated cavity. *Int Commun Heat Mass Transf* 2015;61:162-9.
242. Liu Z, Zhang L, Gong G, Han T. Experimental evaluation of an active solar thermoelectric radiant wall system. *Energy Convers Manage* 2015;94:253-60.
243. Ljung L. System identification toolbox 7. getting started guide, natick, MA, USA: The MathWorks, inc.;march 2008. .
244. Lodi C, Bacher P, Cipriano J, Madsen H. Modelling the heat dynamics of a monitored test reference environment for building integrated photovoltaic systems using stochastic differential equations. *Energy Build* 2012;50:273-81.
245. Lomas KJ, Eppel H, Martin CJ, Bloomfield DP. Empirical validation of building energy simulation programs. *Energy Build* 1997;26(3):253-75.
246. Lou W, Huang M, Zhang M, Lin N. Experimental and zonal modeling for wind pressures on double-skin facades of a tall building. *Energy Build* 2012;54:179-91.
247. Loutzenhiser PG, Manz H, Felsmann C, Strachan PA, Maxwell GM. An empirical validation of modeling solar gain through a glazing unit with external and internal shading screens. *Appl Therm Eng* 2007 2;27(2-3):528-38.
248. Loutzenhiser PG, Manz H, Moosberger S, Maxwell GM. An empirical validation of window solar gain models and the associated interactions. *International Journal of Thermal Sciences* 2009 1;48(1):85-95.
249. Lu Q, Qiu S, Su G, Tian W, Ye Z. Experimental research on heat transfer of natural convection in vertical rectangular channels with large aspect ratio. *Exp Therm Fluid Sci* 2010;34(1):73-80.
250. Lu Q, Ye Z, Qiu S, Su G. Experiment on heat transfer of natural convection in vertical narrow rectangular channels. *Hsi an Chiao Tung Ta Hsueh* 2009;43(3):10,13+41.
251. Lu Y, Wang S, Shan K. Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings. *Appl Energy* 2015 10/1;155:463-77.
252. Luo C, Ji J, Xiong J, Fan M, Sun L, Liao M. Experimental study of a building-integrated dual-function solar collector system. *J Renewable Sustainable Energy* 2015;7(4).
253. Macdonald I, Strachan P. Practical application of uncertainty analysis. *Energy Build* 2001 2;33(3):219-27.
254. Design of compact BIPV façades for the buildings at the university of technology sydney (UTS). *Proceedings of the ASME summer heat transfer conference 2009, HT2009; 2009. .*
255. Madsen H, Holst J. Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building. *Energy Build* 1995 3;22(1):67-79.
256. Flow visualization and air temperature measurements in symmetrically heated vertical channels with adiabatic extensions. *American society of mechanical engineers, heat transfer division, (publication) HTD; 2002. .*
257. Manca O, Nardini S. Thermal design of uniformly heated inclined channels in natural convection with and without radiative effects. *Heat Transfer Eng* 2002;22(2):13-28.

258. Manca O, Nardini S, Ricci D, Tamburrino S. Numerical study of transient natural convection in air in vertical divergent channels. *Numer Heat Transfer Part A Appl* 2011;60(7):580-603.
259. Manz H. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of facade elements. *Energy Build* 2003;35(3):305-11.
260. Manz H, Frank T. Thermal simulation of buildings with double-skin façades. *Energy Build* 2005 11;37(11):1114-21.
261. Manz H, Loutzenhiser P, Frank T, Strachan PA, Bundi R, Maxwell G. Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes—Experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis. *Build Environ* 2006 12;41(12):1784-97.
262. Manz H, Schaelin A, Simmler H. Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double façades. *Build Environ* 2004 9;39(9):1023-33.
263. Manz H. Total solar energy transmittance of glass double façades with free convection. *Energy Build* 2004 2;36(2):127-36.
264. Manz H. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of facade elements. *Energy Build* 2003 3;35(3):305-11.
265. Marcondes F, De Souza Melo V, Gurgel JM. Numerical analysis of natural convection in parallel, convergent, and divergent open-ended channels. *Int J Numer Methods Heat Fluid Flow* 2006;16(3):304-23.
266. Marcondes F, Maliska CR. Treatment of the inlet boundary conditions in natural-convection flows in open-ended channels. *Numer Heat Transfer Part B Fundam* 1999;35(3):317-45.
267. Marinosci C, Semprini G, Morini GL. Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy Build* 2014;72:280-7.
268. Marinosci C, Strachan PA, Semprini G, Morini GL. Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen faade building. *Energy Build* 2011;43(4):853-63.
269. Marques da Silva F, Gomes MG, Rodrigues AM. Measuring and estimating airflow in naturally ventilated double skin facades. *Build Environ* 2015;87:292-301.
270. Martin K, Campos-Celador A, Escudero C, Gómez I, Sala JM. Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility. *Energy Build* 2012 7;50:139-49.
271. Martin K, Escudero C, Erkoreka A, Flores I, Sala JM. Equivalent wall method for dynamic characterisation of thermal bridges. *Energy Build* 2012 12;55:704-14.
272. Martínez-Suástegui L, Treviño C. Transient laminar opposing mixed convection in a differentially and asymmetrically heated vertical channel of finite length. *Int J Heat Mass Transf* 2008;51(25-26):5991-6005.
273. Martínez-Suástegui L, Treviño C. Particle image velocimetry measurements for opposing flow in a vertical channel with a differential and asymmetric heating condition. *Exp Therm Fluid Sci* 2007;32(1):262-75.
274. Martynenko OG, SpringerLink. *Free-convective heat transfer*. 1 Ed ed. Berlin; New York: Springer; 2005.

275. Dummy natural convection heat transfer in vertical fluid layers of high aspect ratio. ASME/JSME 2011 8th thermal engineering joint conference, AJTEC 2011; 2011..
276. Matuska T, Sourek B. Façade solar collectors. *Sol Energy* 2006;80(11):1443-52.
277. First measurement results of a pilot building with transparent façade collectors. *Energy procedia*; 2014. .
278. McEvoy ME, Southall RG, Baker PH. Test cell evaluation of supply air windows to characterise their optimum performance and its verification by the use of modelling techniques. *Energy Build* 2003 11;35(10):1009-20.
279. Mei L, Infield D, Eicker U, Fux V. Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV façade. *Energy Build* 2003 7;35(6):605-17.
280. Mejri O, Palomo Del Barrio E, Ghrab-Morcós N. Energy performance assessment of occupied buildings using model identification techniques. *Energy Build* 2011 0;43(2-3):285-99.
281. Melgaard H, Madsen H. CTLSM: Continuous time linear stochastic modelling. in: Bloem JJ, editor. workshop on application of system identification in energy savings in buildings; p. 41-71. EUR 15566. 1994.
282. Méndez Echenagucia T, Capozzoli A, Cascone Y, Sassone M. The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Appl Energy* 2015;154:577-91.
283. Mingotti N, Chenvidyakarn T, Woods AW. The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin facade. *Build Environ* 2011;46(4):807-23.
284. Mitra A, Dutta TK, Ghosh DN. Augmentation of heat transfer in a bubble agitated vertical rectangular channel. *Heat Mass Transfer* 2012;48(4):695-704.
285. Mohamad AA, Sezai I. Natural convection in C-shaped thermosyphon. *Numer Heat Transfer Part A Appl* 1997;32(3):311-23.
286. Moon JW, Lee J-, Chang JD, Kim S. Preliminary performance tests on artificial neural network models for opening strategies of double skin envelopes in winter. *Energy Build* 2014;75:301-11.
287. Moon JW, Lee J-, Kim S. Evaluation of artificial neural network-based temperature control for optimum operation of building envelopes. *Energies* 2014;7(11):7245-65.
288. Morrone B. Natural convection between parallel plates with conjugate conductive effects. *Numer Heat Transfer Part A Appl* 2001;40(8):873-86.
289. Moukalled F, Lakkis I. Natural-convection heat transfer in channels with isoflux convex surfaces. *Heat Transfer Eng* 2009;30(14):1151-65.
290. Muneer T, Rubie J, Grassie T. *Heat transfer : A problem solving approach* . 1st ed. New York: Taylor & Francis; 2003. .
291. Nakamura H, Asako Y, Naitou T. Heat transfer by free convection between two parallel flat plates. *Numer Heat Transfer* 1982;5:95-106.

292. Nasri Z, Laatar AH, Balti J. Natural convection enhancement in an asymmetrically heated channel-chimney system. *Int J Therm Sci* 2015;90:122-34.
293. Naticchia B, D'Orazio M, Carbonari A, Persico I. Energy performance evaluation of a novel evaporative cooling technique. *Energy Build* 2010;42(10):1926-38.
294. Naveros I, Bacher P, Ruiz DP, Jiménez MJ, Madsen H. Setting up and validating a complex model for a simple homogeneous wall. *Energy Build* 2014;70:303-17.
295. Nelson DJ, Wood BD. Combined heat and mass transfer natural convection between vertical parallel plates. *Int J Heat Mass Transf* 1989;32(9):1779-87.
296. Experimental and numerical investigation of a mechanically ventilated, multiple skin façade with between-the-panes venetian blinds. *ASHRAE transactions*; 2010. .
297. Nield DA. Forced convection in a parallel plate channel with asymmetric heating. *Int J Heat Mass Transfer* 2004 12;47(25):5609-12.
298. Nizovtsev MI, Belyi VT, Sterlygov AN. The facade system with ventilated channels for thermal insulation of newly constructed and renovated buildings. *Energy Build* 2014;75:60-9.
299. Norlén U. Estimating thermal parameters of outdoor test cells. *Build Environ* 1990;25(1):17-24.
300. Ogunfunmi T. Adaptive nonlinear system identification. New York; London: Springer; 2007.
301. Olaf G. Parameter identification with the software package LORD. *Build Environ* 2008 2;43(2):163-9.
302. DYNASTEE, editor. Parameter identification under difficult conditions - how much information is contained in the objective function? ; 12-14 October 2005; ; 2005. id: 183.
303. Olivieri L, Frontini F, Polo-López C, Pahud D, Caamaño-Martín E. G-value indoor characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration: New equipment and methodology. *Energy Build* 2015;101:84-94.
304. Olsson C-. Prediction of nusselt number and flow rate of bouyancy driven flow between vertical parallel plates. *J Heat Transf* 2004;126(1):97-104.
305. Flow dynamics in a double-skin façade. Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on finite differences - finite elements - finite volumes - boundary elements, F-and-B '10; 2010. .
306. Ospir D, Popa C, Chereches C, Polidori G, Fohanno S. Flow visualization of natural convection in a vertical channel with asymmetric heating. *Int Commun Heat Mass Transf* 2012;39(4):486-93.
307. Oyinlola MA, Shire GSF, Moss RW. The significance of scaling effects in a solar absorber plate with micro-channels. *Appl Therm Eng* 2015;90:499-508.
308. Palomo Del Barrio E, Guyon G. Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools. *Energy Build* 2003 11;35(10):985-96.
309. Pantic S, Candanedo L, Athienitis AK. Modeling of energy performance of a house with three configurations of building-integrated photovoltaic/thermal systems. *Energy Build* 2010;42(10):1779-89.
310. Papanastasiou TC, Alexandrou AN, Georgiou GC. Viscous fluid flow. CRC Press; 2000.

311. Pappas A, Zhai Z. Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy-driven airflow. *Energy Build* 2008;40(4):466-75.
312. Park J, Kim T, Leigh S-. Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions. *Sol Energy* 2014;105:561-74.
313. Pasut W, De Carli M. Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin façade. *Appl Therm Eng* 2012 5;37:267-74.
314. Pisello AL, Cotana F, Nicolini A, Buratti C. Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal-energy performance in winter conditions: In field experiment. *Energy Build* 2014;80:218-30.
315. Polidori G, Fatnassi S, Ben Maad R, Fohanno S, Beaumont F. Early-stage dynamics in the onset of free-convective reversal flow in an open-ended channel asymmetrically heated. *Int J Therm Sci* 2014;88:40-6.
316. Pop I, Ingham DB. *Convective heat transfer*. Oxford: Pergamon; 2001..
317. Popa C, Ospir D, Fohanno S, Chereches C. Numerical simulation of dynamical aspects of natural convection flow in a double-skin façade. *Energy Build* 2012;50:229-33.
318. Poulad ME, Naylor D, Oosthuizen PH. Measurement of time-averaged turbulent free convection in a tall enclosure using interferometry. *J Heat Transf* 2011;133(4).
319. Quesada G, Rouse D, Dutil V, Badache M, Hallé S. A comprehensive review of solar facades. opaque solar facades. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2012;16(5):2820-32.
320. Ramanathan S, Kumar R. Correlations for natural convection between heated vertical plates. *Journal of Heat Transfer*, 113 (1991), Pp 97–107 1991;113:97-107.
321. Ramdani N, Candau Y, Dautin S, Delille S, Rahni N, Dalicieux P. How to improve building thermal simulation programs by use of spectral analysis. *Energy Build* 1997;25(3):223-42.
322. Reda F. Long term performance of different SAGSHP solutions for residential energy supply in finland. *Appl Energy* 2015;144:31-50.
323. Richter J, Lu F, Zeiler W, Boxem G, Labeodan T. Double façades: Comfort and ventilation aspects at an extremely complex case study. *Int J Sustainable Energy* 2015;34(8):485-505.
324. Thermal performance of uninsulated and partially filled wall cavities. *ASHRAE transactions*; 2011.
325. Rodrigues AM, Aelenei L. Thermal performance of a naturally ventilated cavity wall. *Int J Energy Res* 2010;34(4):357-72.
326. Roeleveld D, Naylor D. Flow visualization of natural convection in vertical channels with opposing buoyancy forces. *Exp Therm Fluid Sci* 2014;54:61-70.
327. Roeleveld D, Naylor D, Leong WH. Free convection in asymmetrically heated vertical channels with opposing buoyancy forces. *J Heat Transf* 2014;136(6).
328. Rohsenow WM, Hartnett JPG,E.N. *Handbook of heat transfer fundamentals*. United States, New York, NY: McGraw-Hill Book Co.; 1998. .

329. Romila C, Popovici CG, Chereches N-. Reduction of building energy consumption using ventilated façades. *Environ Eng Manage J* 2012;11(4):806-11.
330. Ryan D, Burek SAM. Experimental study of the influence of collector height on the steady state performance of a passive solar air heater. *Sol Energy* 2010;84(9):1676-84.
331. Ryan EM, Sanquist TF. Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions. *Energy Build*(0).
332. Sadineni SB, Madala S, Boehm RF. Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2011;15(8):3617-31.
333. Saelens D, Hens H. Experimental evaluation of airflow in naturally ventilated active envelopes. *J Therm Envelope Build Sci* 2001;25(2):101-27.
334. Saelens D, Roels S, Hens H. The inlet temperature as a boundary condition for multiple-skin facade modelling. *Energy Build* 2004;36(8):825-35.
335. Saelens D, Roels S, Hens H. Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades. *Build Environ* 2008 4;43(4):638-50.
336. Safer N, Woloszyn M, Roux JJ. Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind. *Sol Energy* 2005;79(2):193-203.
337. Salah El-Din MM. Effect of thermal and mass buoyancy forces on the development of laminar mixed convection between vertical parallel plates with uniform wall heat and mass fluxes. *Int J Therm Sci* 2003;42(5):447-53.
338. Saleh H, Hashim I. Flow reversal of fully-developed mixed MHD convection in vertical channels. *Chin Phys Lett* 2010;27(2).
339. Sanjuan C, Suárez MJ, González M, Pistono J, Blanco E. Energy performance of an open-joint ventilated façade compared with a conventional sealed cavity façade. *Sol Energy* 2011;85(9):1851-63.
340. Santos PLd. Linear parameter-varying system identification :New developments and trends. Singapore; London: World Scientific; 2012.
341. Sanvicente E, Giroux-Julien S, Ménézo C, Bouia H. Transitional natural convection flow and heat transfer in an open channel. *Int J Therm Sci* 2013;63:87-104.
342. Schlichting H, Gersten K. Boundary-layer theory. 8th ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2000.
343. Schreitmüller K, et a. Design of an advanced passive solar test facility. DFVLR Stuttgart. Report prepared for the Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science Research and Development, Brussels. 1985.
344. Sefcik DM, Webb BW, Heaton HS. Analysis of natural convection in vertically-vented enclosures. *Int J Heat Mass Transf* 1991;34(12):3037-46.
345. Seferis P, Strachan P, Dimoudi A, Androustopoulos A. Investigation of the performance of a ventilated wall. *Energy Build* 2011 9;43(9):2167-78.

346. Seo D-, Koo C, Hong T. A lagrangian finite element model for estimating the heating and cooling demand of a residential building with a different envelope design. *Appl Energy* 2015;142:66-79.
347. Serra V, Zanghirella F, Perino M. Experimental evaluation of a climate façade: Energy efficiency and thermal comfort performance. *Energy Build* 2010 1;42(1):50-62.
348. Shah RK, London AL, Irvine TF, Hartnett JP. *Laminar flow forced convection in ducts*. Academic Press; 1978.
349. Shang D, SpringerLink. *Free convection film flows and heat transfer*. 2nd ed. Berlin; New York: Springer; 2012.
350. Shang D. *Free convection film flows and heat transfer*. Berlin: Springer; 2006.
351. Skok H, Ramadhani S, Schoenhals RJ. Natural convection in a side-facing open cavity. *Int J Heat Fluid Flow* 1991;12(1):36-45.
352. Søren Østergaard J. Validation of building energy simulation programs: A methodology. *Energy Build* 1995;22(2):133-44.
353. Soto Francés VM, Sarabia Escriba EJ, Pinazo Ojer JM, Bannier E, Cantavella Soler V, Silva Moreno G. Modeling of ventilated façades for energy building simulation software. *Energy Build* 2013;65:419-28.
354. Sparrow EM, Azevedo LFA. Vertical-channel natural convection spanning between the fully-developed limit and the single-plate boundary-layer limit. *Int J Heat Mass Transf* 1985;28(10):1847-57.
355. Sparrow EM, Chrysler GM, Azevedo LF. Observed flow reversals and measured-predicted nusselt numbers for natural convection in a one-sided heated vertical channel. *J Heat Transfer Trans ASME* 1984;106(2):325-32.
356. Stazi F, Vegliò A, Di Perna C. Experimental assessment of a zinc-titanium ventilated façade in a mediterranean climate. *Energy Build* 2014;69:525-34.
357. Strachan PA. Simulation support for performance assessment of building components. *Build Environ* 2008 2;43(2):228-36.
358. Strachan PA. Model validation using the PASSYS test cells. *Build Environ* 1993 4;28(2):153-65.
359. Strachan PA, Baker PH. Outdoor testing, analysis and modelling of building components. *Build Environ* 2008 2;43(2):127-8.
360. Strachan PA, Vandaele L. Case studies of outdoor testing and analysis of building components. *Build Environ* 2008 2;43(2):129-42.
361. Suárez C, Joubert P, Molina JL, Sánchez FJ. Heat transfer and mass flow correlations for ventilated facades. *Energy Build* 2011;43(12):3696-703.
362. Sun W, Ji J, Luo C, He W. Performance of PV-trombe wall in winter correlated with south façade design. *Appl Energy* 2011;88(1):224-31.
363. Sun Y, Huang P, Huang G. A multi-criteria system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties. *Energy Build* 2015;97:196-204.

364. Sung UJ, Cho S, Seo DH, Song KD. Analysis of reduced cooling load for a multistorey-building incorporating a ventilated double skin façade with a solar chimney channel. *Int J Vent* 2013;11(4):381-92.
365. Tangirala AK. Principles of system identification :Theory and practice. CRC Press, Taylor & Francis Group; 2015.
366. Tellez F. Checking confidence intervals estimation by MRQT identification method, in: Workshop on application of system identification in energy savings in buildings, pp.281, edited by J.J. bloem, 1994.
367. Terekhov VI, Ekaid AL. Laminar natural convection between vertical isothermal heated plates with different temperatures. *J Eng Thermophys* 2011;20(4):416-33.
368. Terés-Zubiaga J, Campos-Celador A, González-Pino I, Escudero-Revilla C. Energy and economic assessment of the envelope retrofitting in residential buildings in northern Spain. *Energy Build* 2015;86:194-202.
369. Terés-Zubiaga J, Escudero C, García-Gafaro C, Sala JM. Methodology for evaluating the energy renovation effects on the thermal performance of social housing buildings: Monitoring study and grey box model development. *Energy Build* 2015 9/1;102:390-405.
370. Tetsu F, Shigeru K, Buenconsejo Jr. NS. Laminar free convection flow rate in a vertical tube. *Int J Heat Mass Transf* 1988;31(4):831-41.
371. Thiers S, Peuportier B. Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings. *Build Environ* 2012 5;51(0):276-84.
372. Tkachenko OA, Timchenko V, Giroux-Julien S, Ménézo C, Yeoh GH, Reizes JA, Sanvicente E, Fossa M. Numerical and experimental investigation of unsteady natural convection in a non-uniformly heated vertical open-ended channel. *International Journal of Thermal Sciences* 2016 1;99:9-25.
373. Toro EF. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics :A practical introduction. 2nd ed. Berlin; New York: Springer-Verlag; 1999.
374. Tronchin L, Fabbri K. A round robin test for buildings energy performance in Italy. *Energy Build* 2010 10;42(10):1862-77.
375. van Dijk D, Versluis R. PV-HYBRID-PAS: Results of thermal performance assessment, Vienna. Proceedings 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion 1998.
376. Van Dijk HAL, Van der Linden GP. The PASSYS method for testing passive solar components. *Build Environ* 1993 4;28(2):115-26.
377. van Dijk H, van der Linden G. MRQT user guide; manual for MRQT and the package MRQT/PASTA. in: Bloem JJ, editor. workshop on application of system identification in energy savings in buildings. p. 3-39,1994.
378. Vandaele L, Wouters P. *The PASSYS services: Summary report*. BBRI & European Commission – Directorate - General XII, EUR 15113 EN, Brussels, 1994.
379. Wang LV. System identification with quantized observations. Boston: Birkhäuser; 2010.

380. Wang Y, Liu Y, Wang D, Liu J. Effect of the night ventilation rate on the indoor environment and air-conditioning load while considering wall inner surface moisture transfer. *Energy Build* 2014;80:366-74.
381. Wang ZY, Zhang TY, Liu CR, Yang SF, Cui N. Research review of impact of double skin facade's structural factors on cavity heat transfer. *Adv Mater Res* 2014;1030-1032:588-93.
382. Warre P. Integral building envelope performance assessment. *Energy Conservation in Buildings I and Community Systems* ed. United Kingdom: FaberMaunsell Ltd; 2003. Technical Synthesis Report IEA ECBCS Annex 32.
383. Warsi ZUA. Fluid dynamics :Theoretical and computational approaches. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis; 2006.
384. Wingfield J, MilesShenton D, Bell M. Comparison of measured versus predicted heat loss for new build UK dwellings – unpublished data, leeds metropolitan university, leeds, UK. ; 2011.
385. Wouters P, Vandaele L, Voit P, Fisch N. The use of outdoor test cells for thermal and solar building research within the PASSYS project. *Build Environ* 1993 4;28(2):107-13.
386. Wright JL, Jin H, Hollands KGT, Naylor D. Flow visualization of natural convection in a tall, air-filled vertical cavity. *Int J Heat Mass Transf* 2006;49(5-6):889-904.
387. Xamán J, Álvarez G, Lira L, Estrada C. Numerical study of heat transfer by laminar and turbulent natural convection in tall cavities of façade elements. *Energy Build* 2005;37(7):787-94.
388. Xu XW, Su YX. Modeling of natural ventilation in built-in photovoltaic-trombe wall. *Appl Mech Mater* 2014;448-453:1537-41.
389. Yadav V, Kant K. Convective cooling of a PCB like surface with mixed heating conditions in a vertical channel. *Trans ASME* 2007;129(2):129-43.
390. Yan WM, Lin TF. Heat transfer in buoyancy-driven channel flows with the simultaneous presence of laminar, transitional and turbulent flow regimes. *Heat Mass Transfer* 1989;24(2):125-32.
391. Yang HX, Zhu ZJ. Numerical study on transient laminar natural convection in an inclined parallel- walled channel. *Int Commun Heat Mass Transf* 2003;30(3):359-67.
392. Yang Y, Wang Q, Xiu D, Zhao Z, Sun Q. A building integrated solar collector: All-ceramic solar collector. *Energy Build* 2013;62:15-7.
393. Yih Nen Jeng, Jiann Lin Chen, Win Aung. On the reynolds-number independence of mixed convection in a vertical channel subjected to asymmetric wall temperatures with and without flow reversal. *Int J Heat Fluid Flow* 1992;13(4):329-39.
394. Yilmaz T, Fraser SM. Turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating. *Int J Heat Mass Transf* 2007;50(13-14):2612-23.
395. Yilmaz T, Gilchrist A. Temperature and velocity field characteristics of turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating. *Heat Mass Transfer* 2007;43(7):707-19.
396. Comparative study of static vs. dynamic controls of double-skin systems. IBPSA 2009 - international building performance simulation association 2009; 2009.

397. Zalewski L, Chantant M, Lassue S, Duthoit B. Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy Build* 1997 2/15;25(1):7-18.
398. Zalewski L, Joulin A, Lassue S, Dutil Y, Rousse D. Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material. *Sol Energy* 2012;86(1):208-19.
399. Zamora B, Hernández J. Influence of variable property effects on natural convection flows in asymmetrically-heated vertical channels. *Int Commun Heat Mass Transf* 1997;24(8):1153-62.
400. Zamora B, Kaiser AS. Optimum wall-to-wall spacing in solar chimney shaped channels in natural convection by numerical investigation. *Appl Therm Eng* 2009 3;29(4):762-9.
401. Zeng Z, Li X, Li C. CFD modeling method study on natural ventilation performance of double skin façade. *Taiyangneng Xuebao* 2013;34(12):2095-100.
402. Zeytounian RK. *Theory and applications of viscous fluid flows*. New York: Springer; 2003.
403. Zienkiewicz OC, Taylor RL, Nithiarasu P. *The finite element method for fluid dynamics*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2014. .
404. Zogou O, Stapountzis H. Flow and heat transfer inside a PV/T collector for building application. *Appl Energy* 2012;91(1):103-15.



*Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos*





ANEXOS

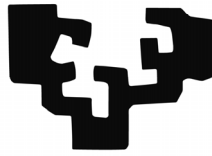
Caracterización Experimental del Comportamiento Energético de Fachadas Ventiladas

César Escudero Revilla
2016



Fotografía portada:
James Natchwey

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



*Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos*

Anexos

Caracterización Experimental del Comportamiento Energético de Fachadas Ventiladas

César Escudero Revilla
(Ingeniero Industrial)

Universidad del País Vasco (UPV/EHU), en cumplimiento con los requisitos para el grado de doctor dentro del programa de doctorado Ingeniería Térmica del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

Directores de Tesis:
Dr. José María Pedro Sala Lizarraga
Dr. Koldobika Martín Escudero

Vitoria-Gasteiz, 2016



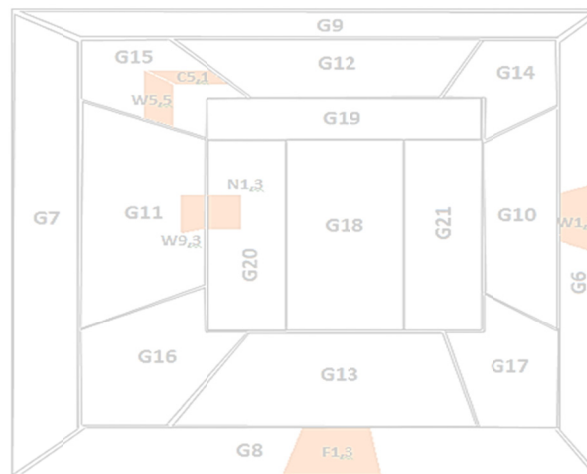
Índice



Anexo A.....	1
A.1 Rutinas de ensayo.....	3
A.2 Datos experimentales	5
A.2.1 Rutina ROLBS	5
A.2.2 Rutina PRBS.....	12
A.3 Modelos experimentales	18
A.3.1 Modelo de la celda	18
A.3.2 Modelo del muro de calibración.....	61
Anexo B.....	89
B.1 Datos experimentales.....	91
B.1.1 Primer componente	91
B.1.2 Segundo componente.....	96
B.2 Modelos matemáticos.....	101
B.2.2 Modelos del primer componente.....	101
B.2.3 Modelos del segundo componente.....	116
Anexo C.....	127
C.1 Muro base	129
C.1.1 Instrumentación de la muestra	129
C.1.2 Datos experimentales complementarios.....	131
C.2 Muro base con aislamiento	137
C.2.1 Instrumentación de la muestra	137
C.2.2 Datos experimentales complementarios.....	139
C.3 Fachada ventilada ligera	145
C.3.1 Instrumentación de la muestra	145
C.3.2 Datos experimentales ensayo de contraste	148
C.4 Fachada ventilada pesada.....	154
C.4.1 Instrumentación de la muestra	154
C.4.2 Datos experimentales ensayo de contraste	157
C.5 Fachada ventilada forzada	163
C.5.1 Instrumentación de la muestra	163
C.5.2 Datos experimentales ensayos de contraste	166
C.6 Ensayo de infiltraciones	171
Anexo D	175
D.1 Modelo de muro base sin aislamiento	177
D.1.1 Modelo unidimensional	177
D.1.2 Modelo completo.....	180
D.2 Modelo de muro base con aislamiento.....	184
D.2.1 Modelo unidimensional	184
D.2.2 Modelo completo	187
D.3 Modelo de fachada ventilada.....	192
D.3.1 Modelo CFD	192
D.3.2 Modelo de parámetros concentrados.....	211

Anexo A

Ensayo de Calibración



A.1 Rutinas de ensayo

Como se indica en el apartado 2.1.1 del Capítulo 2 para la realización de los ensayos se emplea dos tipos de rutinas denominadas PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) y ROLBS (*Randomly Ordered Logarithmically distributed Binary Sequence*). La forma de ambas secuencias se muestra en la Figura A.1.

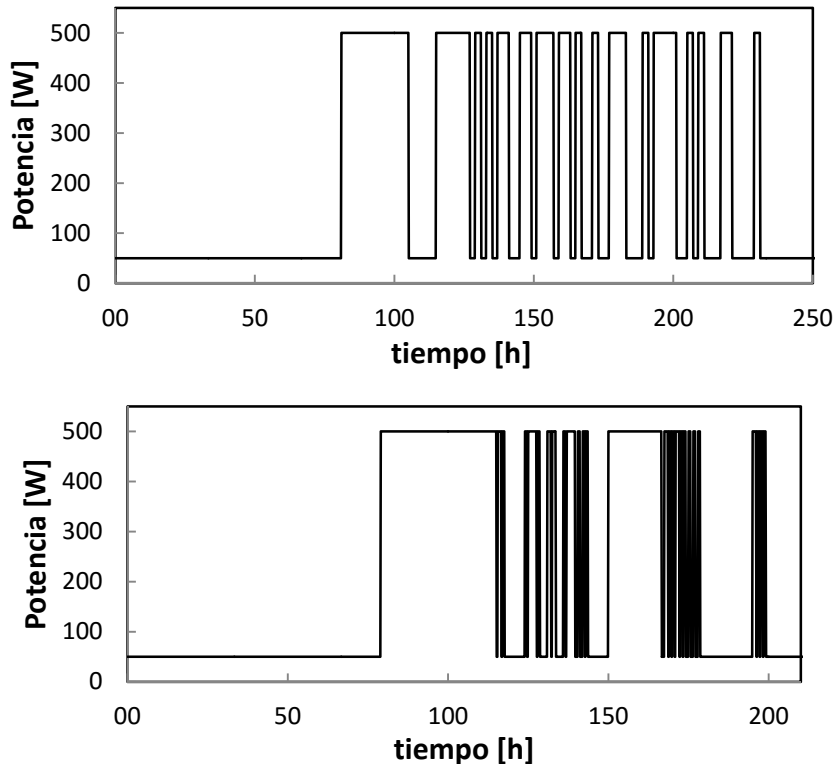


Figura A.1 – Rutina PRBS, gráfica superior, y rutina ROLBS, gráfica inferior

En la Tabla A.1 se recogen el patrón de ambas secuencias. En el caso de la rutina PRBS el intervalo mínimo de trabajo es de $\Delta t = 2$ [h] y la duración del ciclo de calefactor es de $T = 152$ [h], con un periodo previo de estabilización libre, sin calentamiento, de $T_{inicial} = 72$ [h]. Esta rutina de ensayo permite analizar el comportamiento a frecuencias medias y por tanto, adecuado para muestras con una inercia representativa. En el caso de la rutina ROLBS, el intervalo mínimo es de $\Delta t = 0,5$ [h], y la duración del ciclo de calentamiento es de $T = 120$ [h]. Ambas rutinas son aplicables a cualquier tipo de muestra bajo ensayo, aunque la rutina PRBS es de mayor interés en el estudio de muestras con inercia representativa, y la rutina ROLBS está más orientada a muestras ligeras. Lo idóneo se realizar ambas rutinas en todos los ensayos, como ha sido el caso del presente trabajo de tesis, pero si no se dispone del tiempo necesario la rutina base de ensayo sería la rutina ROLBS. Estas rutinas han sido desarrolladas por la red PASLINK, y están recogidas dentro de la documentación y manuales asociados, pero en algunos casos es complicado acceder a dicha información. En este documento simplemente se quiere hacer más accesible dichos datos para otros investigadores.

PRBS		ROLBS		ROLBS	
Δt [h]	calefactor	Δt [h]	calefactor	Δt [h]	Calefactor
72	0	72	0	1	0
24	1	36	1	0,5	1
10	0	0,5	0	1	0
12	1	1	1	0,5	1
2	0	0,5	0	1	0
2	1	6,5	1	0,5	1
2	0	0,5	0	16,5	0
2	1	0,5	1	1	1
2	0	0,5	0	0,5	0
4	1	2,5	1	0,5	1
4	0	0,5	0	0,5	0
4	1	0,5	1	0,5	1
2	0	2,5	0	0,5	0
6	1	1	1	0,5	1
2	0	0,5	0		
4	1	1	1		
2	0	2,5	0		
2	1	0,5	1		
4	0	0,5	0		
2	1	2,5	1		
4	0	1	0		
6	1	0,5	1		
6	0	1	0		
2	1	0,5	1		
2	0	0,5	0		
8	1	0,5	1		
4	0	6,5	0		
2	1	16,5	1		
2	0	0,5	0		
2	1	1	1		
6	0	0,5	0		
4	1	0,5	1		
8	0	0,5	0		
2	1	0,5	1		
		0,5	0		
		1	1		
		0,5	0		
		0,5	1		
		0,5	0		
		0,5	1		

Tabla A.1 – Secuencia de las rutinas PRBS y ROLBS

A.2 Datos experimentales

El proceso de calibración se realiza aplicando las tres rutinas de ensayo usuales de trabajo, la rutina *PULSO*, *ROLBS* y *PRBS*. Este procedimiento de trabajo permite obtener unos factores de calibración más fiables y representativos del comportamiento global de la celda durante los ensayos, principalmente en la medida del flujo de calor que intercambia la envolvente de la sala de ensayos. En la memoria se expone un análisis detallado de los datos experimentales tomando como referencia la rutina *PULSO*, a continuación se muestran los datos del resto de ensayos que posteriormente se aplican al estudio de la medida de los efectos de borde y al proceso de identificación de parámetros de los modelos de la celda.

Además, el proceso de calibración corresponde con los primeros pasos en el uso de la celda *PASLINK*, y por tanto, es una fase fundamental para comenzar a conocer del comportamiento del equipo, junto con la repercusión del proceso de calibración en la fiabilidad de los resultados de ensayos posteriores durante el periodo de uso. Pero, sobre todo, es la primera toma de contacto fundamental con la metodología de trabajo. En esta primera fase no hay que escatimar en repetir las rutinas, en analizar con detalle todos los datos disponibles, comprender que sucede en cada uno de los ámbitos, como por ejemplo, medida del flujo de calor, perfiles de temperaturas, etc..., ya que es la fase en la que se deben ajustar correctamente todos los parámetros. Y aunque el equipo está diseñado con unos estándares de trazabilidad muy buenos, cada celda de ensayos es particular, y los técnicos que la empleen deben conocer su equipo con detalle para poder obtener resultados precisos y representativos.

A.2.1 Rutina *ROLBS*

Para comenzar el proceso de calibración lo más idóneo es aplicar primero la rutina *PULSO* y posteriormente las dos rutinas con régimen aleatorio, el orden de estas puede ser cualquiera. En este caso, se comienza por la rutina *ROLBS*, y posteriormente se aplica la rutina *PRBS*. Este orden tiene como objetivo la detección de posibles errores de medida de las *tilas* o de las sondas de temperatura. La rutina *PULSO*, por su sencillez permite detectar malfuncionamientos de los sensores de medida, algún grupo específico de *tilas*, o algún sensor de las *multitilas*, o verificar la homogeneidad de las temperaturas del ambiente para el ajuste de la potencia de ventilación en la sala de ensayos. Por su complejidad, primero se comienza el análisis por la medida del flujo de calor y posteriormente se estudian las temperaturas.

A.2.1.1 Flujo de la envolvente

En la Figura A.2 se muestran la potencia eléctrica inyectada en el ventilador y el calefactor de la sala de ensayos junto al flujo total que atraviesa la envolvente. Como ya se comenta en la memoria, el rizado de la señal eléctrica es elevado debido a la red de abastecimiento. Este rizado, en principio no presenta mayor relevancia, pero posteriormente se emplea una *SAI*, *Sistema de Alimentación Ininterrumpida*, con un filtro que permite obtener una alimentación eléctrica de mayor calidad, lo que reduce el ruido en las medidas del conjunto de la instrumentación del ensayo, mejorando así, la calidad de la información que posteriormente se emplea en los procesos de identificación de parámetros, muy sensibles a dicho ruido.

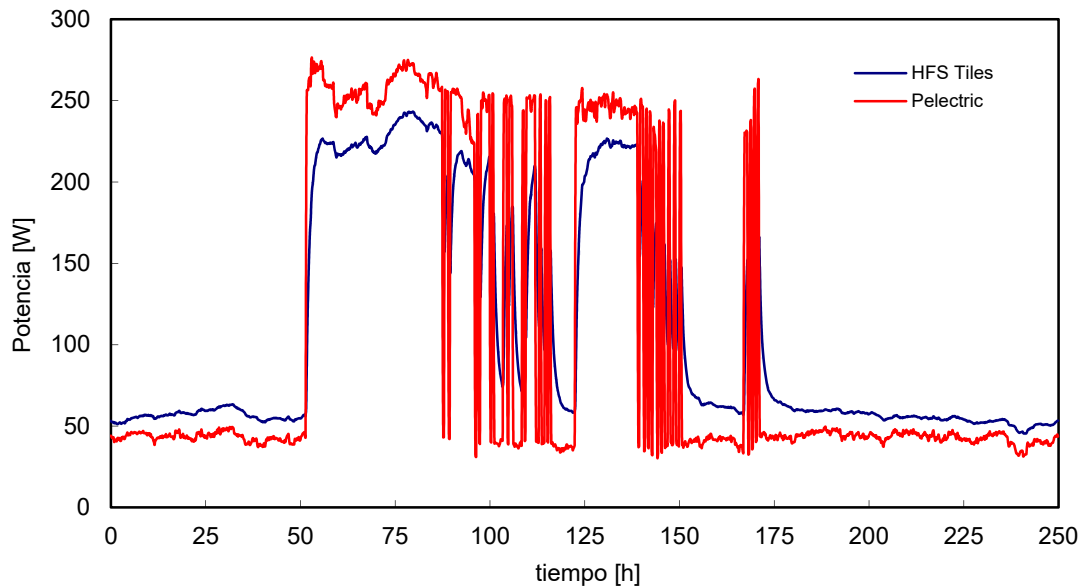


Figura A.2 – Potencia eléctrica de calentamiento y medida del flujo de las HFS Tiles para las rutinas ROLBS

Aunque la señal del flujo total de la envolvente sea correcta es necesario verificar que cada grupo se comporta adecuadamente, ya que la suma total puede emascarar algún comportamiento erróneo de algún grupo en particular. El primer paso es verificar los flujos medios por unidad de superficie para cada uno de dichos grupos que recubren las paredes interiores de la envolvente de la sala de ensayos, ver Figura A.3. Se debe cumplir que los flujos mínimos se obtienen en los grupos centrales de cada superficie, y dichos valores deben estar próximos entre sí. Los grupos de borde correspondientes a las esquinas longitudinales deben presentar un flujo superior a cualquiera de los flujos centrales que les rodean, y deben los superiores e inferiores deben parecerse entre sí. Los flujos de la cara norte deben ser homogéneos, y los flujos de los grupos de borde que rodean la muestra deben presentar los valores más elevados y con mayor divergencia entre sí.

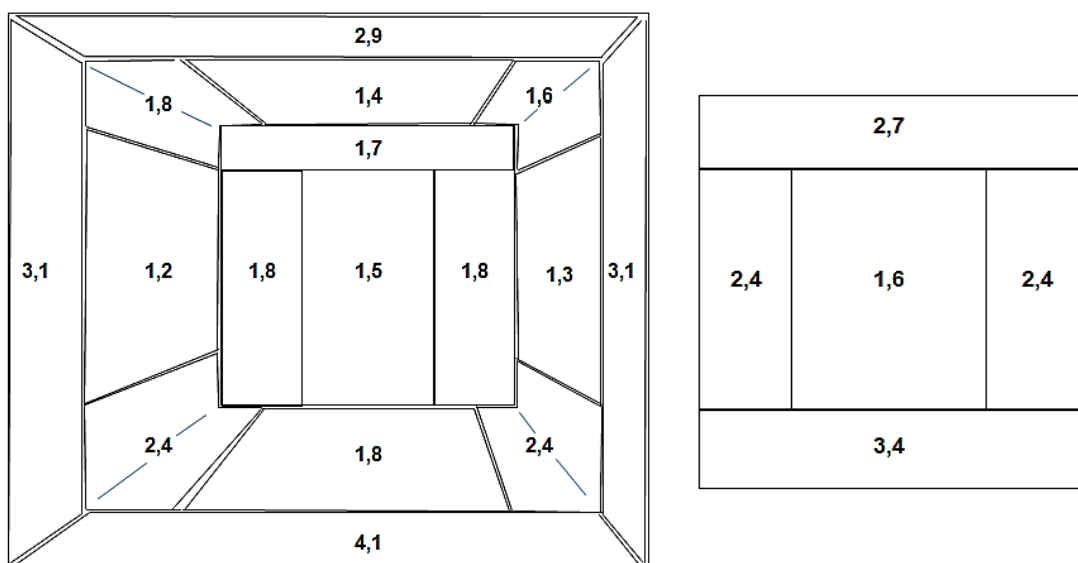


Figura A.3 – Flujos promedio por unidad de superficie en la cara norte, y envolvente de la sala de ensayos, izquierda, y en el muro de calibración, derecha, para la rutina ROLBS

El siguiente paso es analizar la evolución a lo largo del tiempo del flujo, comparando entre sí los grupos situados en zonas equicalentes, aplicando el chequeo de resultados esperados que se indica en la memoria. Los datos experimentales se muestran en la Figura A.4 a la Figura A.14. Como se puede observar, los resultados son similares en el comportamiento a los obtenidos en el estudio de la rutina *PULSO*, desarrollado con más detalle en la memoria.

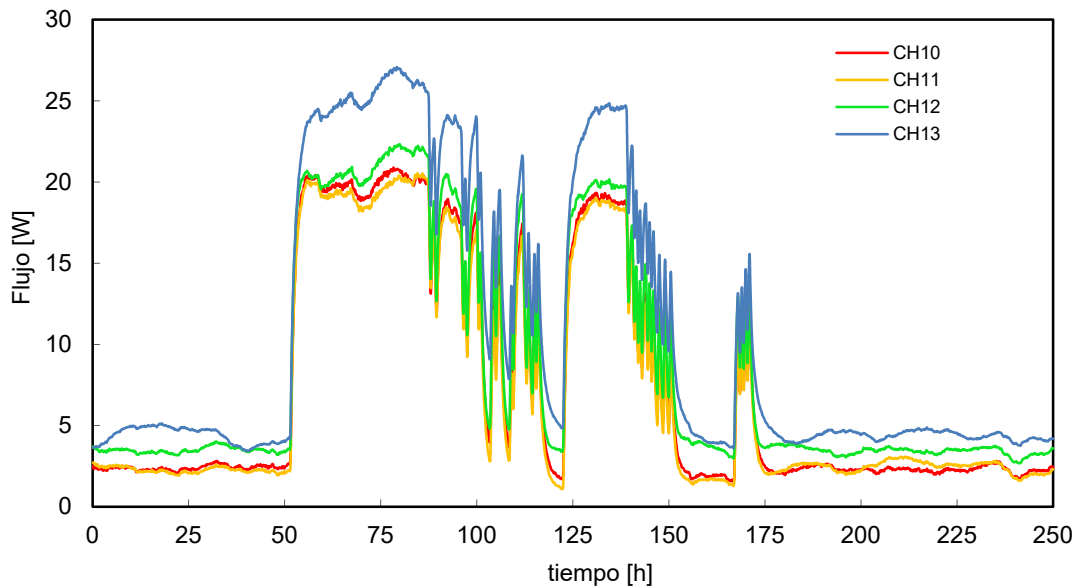


Figura A.4 – Flujo medido por los grupos centrales de la envolvente de la sala de ensayo

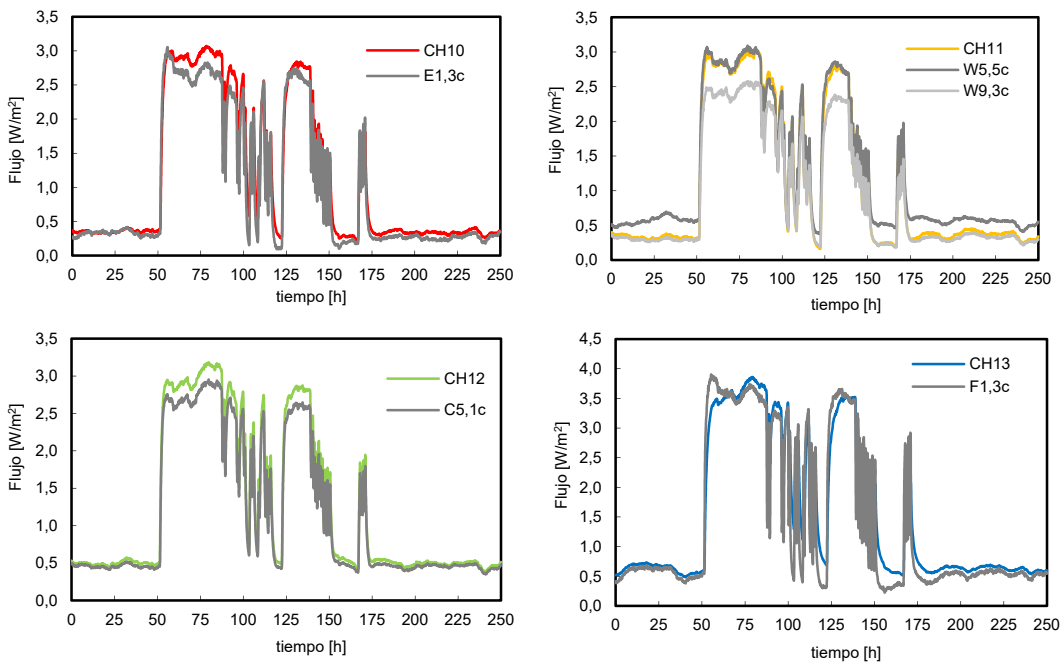


Figura A.5 – Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie de los grupos centrales equivalentes

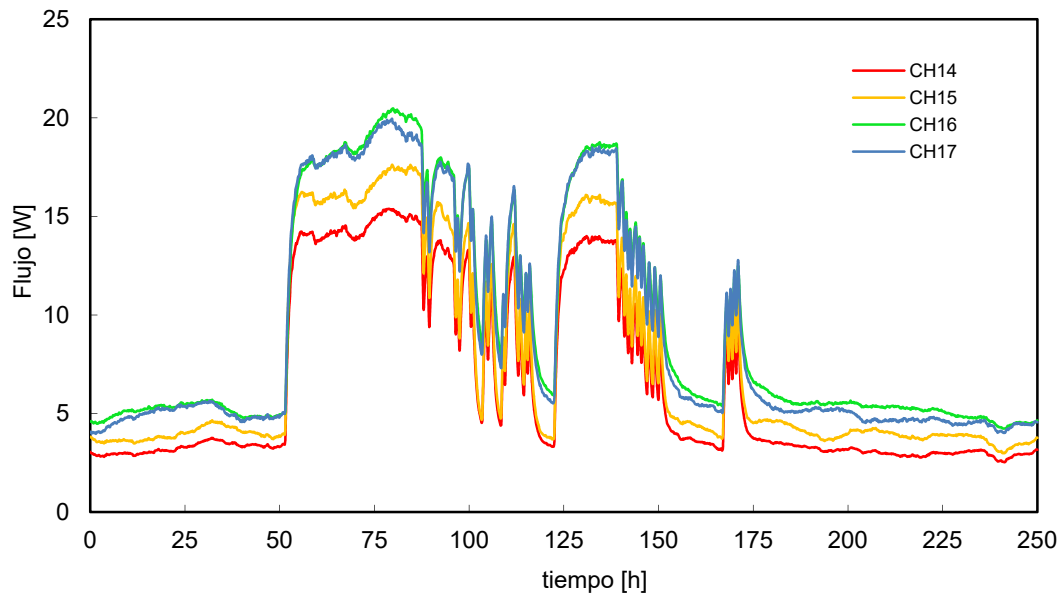


Figura A.6 – Flujo medido por los grupos de borde longitudinales, tipología 1, de la envolvente de la sala de ensayo

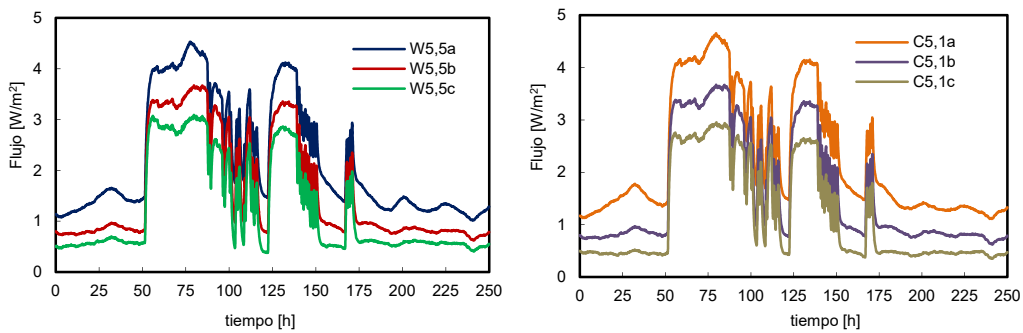


Figura A.7 – Flujo medido por los tres sensores de las multiteles empleadas para la caracterización de los efectos de borde longitudinales, tipología 1

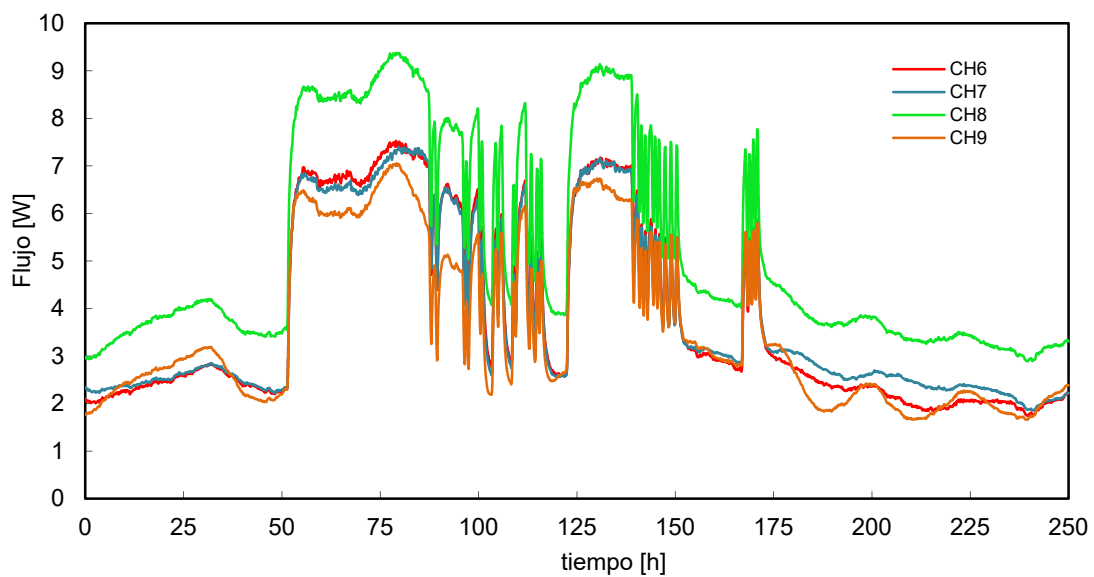


Figura A.8 – Flujo medido por los grupos de borde sur, tipología 2 y 3, de la envolvente de la sala de ensayo

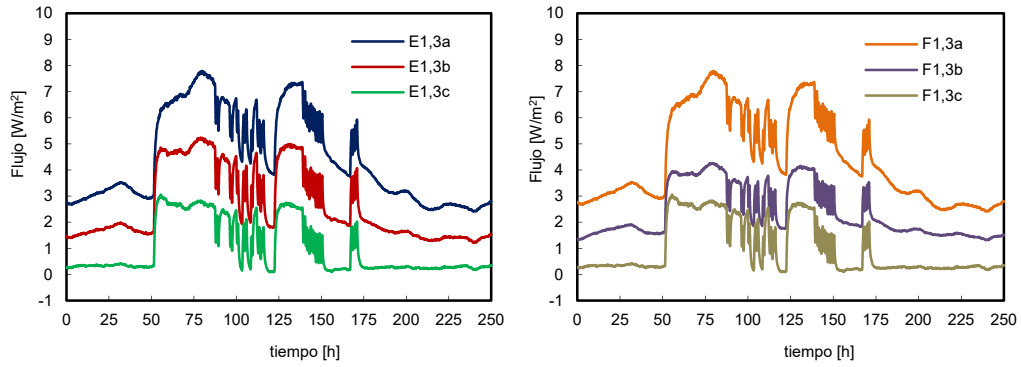


Figura A.9 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde sur, *tipología 2 y 3*

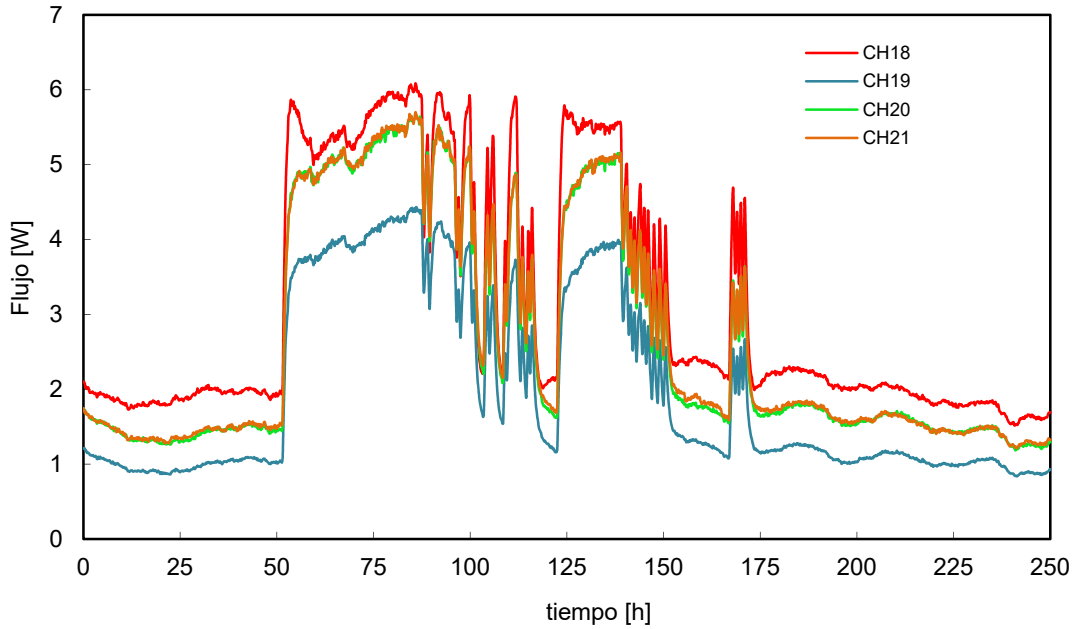


Figura A.10 – Flujo medido por los grupos de borde norte, *tipología 4*, de la envolvente de la sala de ensayo

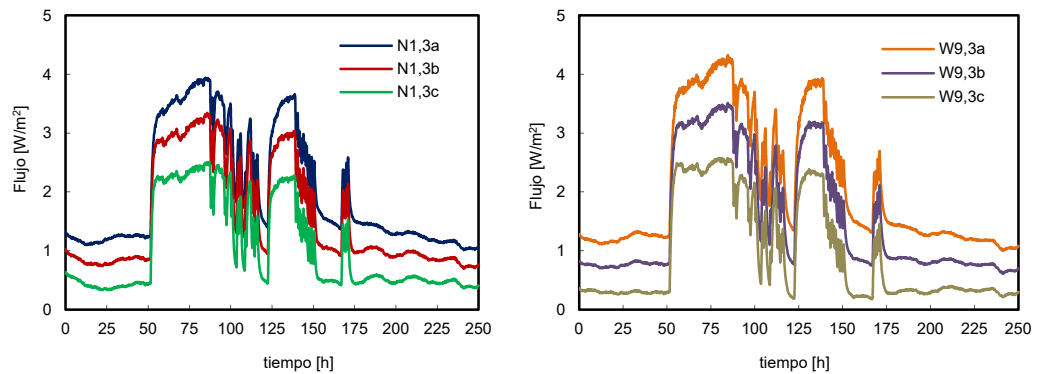


Figura A.11 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde norte, *tipología 4*

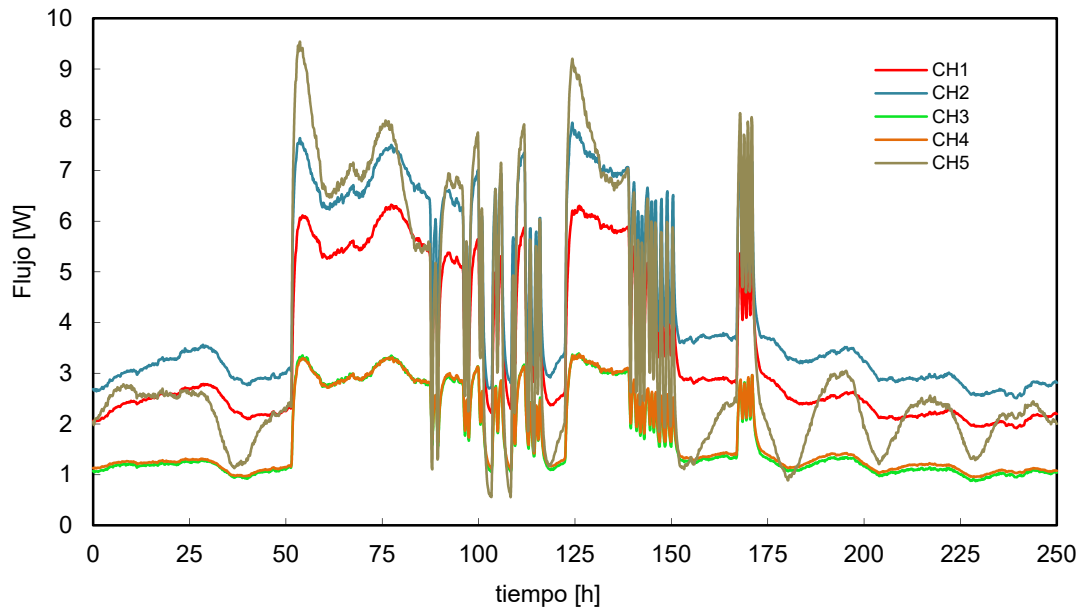


Figura A.12– Flujo medido por los grupos del muro de calibración

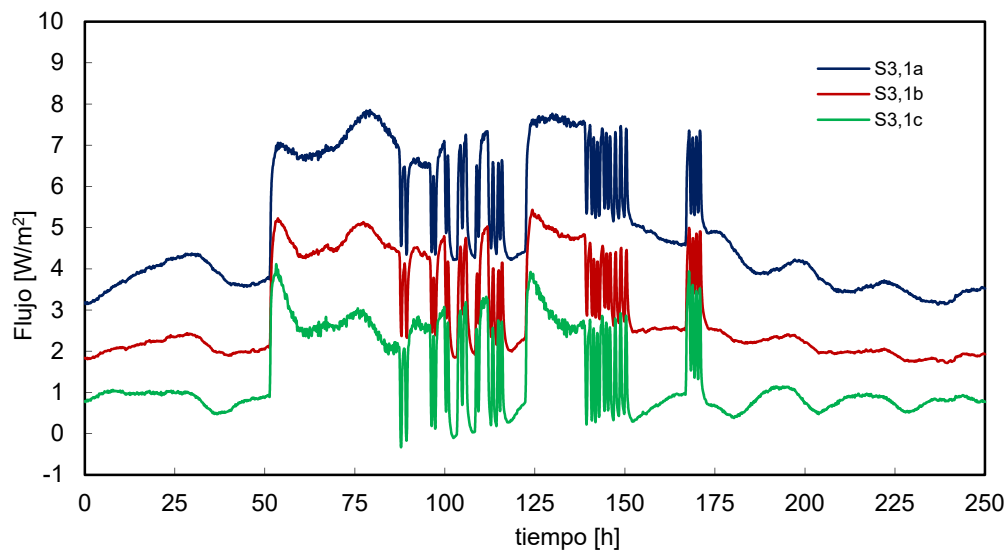


Figura A.13– Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie del grupo central del muro de calibración

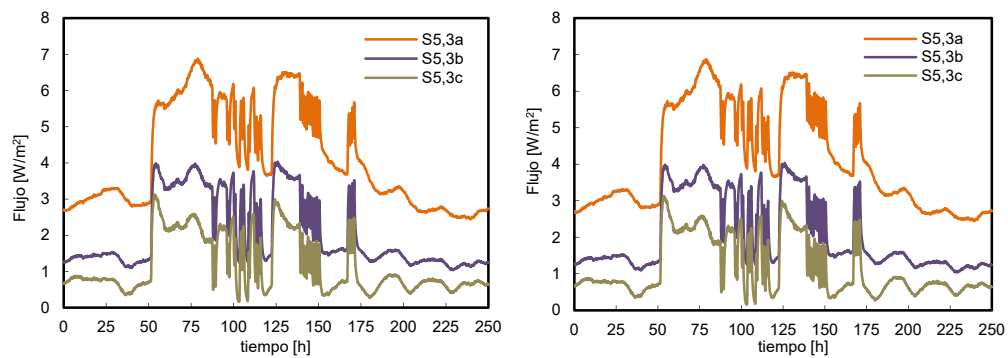


Figura A.14– Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde en el muro de calibración

A.2.1.2 Temperaturas

El análisis de las temperaturas es fundamental para asegurar unas condiciones idóneas para el precoso de identificación de parámetros. Por un lado, se debe asegurar un salto de temperaturas suficiente entre el ambiente interior de la sala de ensayos y el exterior como para conseguir un flujo intercambiado con una incertidumbre reducida. Por otro lado, hay que asegur unas condiciones homogéneas de las temperaturas interiores del aire sala de ensayos de cara a simplificar los modelos de trabajo. El aseguramiento de estas condiciones se muestra desde la Figuras A.15 a la Figura A.17, para el periodo de ensayo en el que se aplica la rutina *ROLBS*.

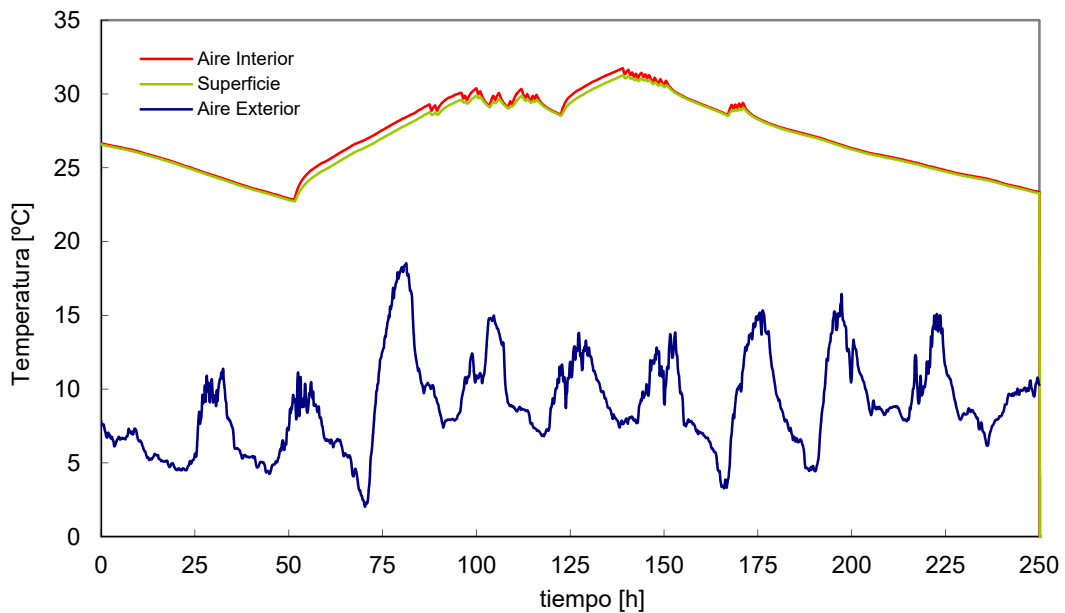


Figura A.15– Temperaturas de aire y superficie de la sala de ensayos y temperatura exterior ventilada para la rutina *ROLBS*

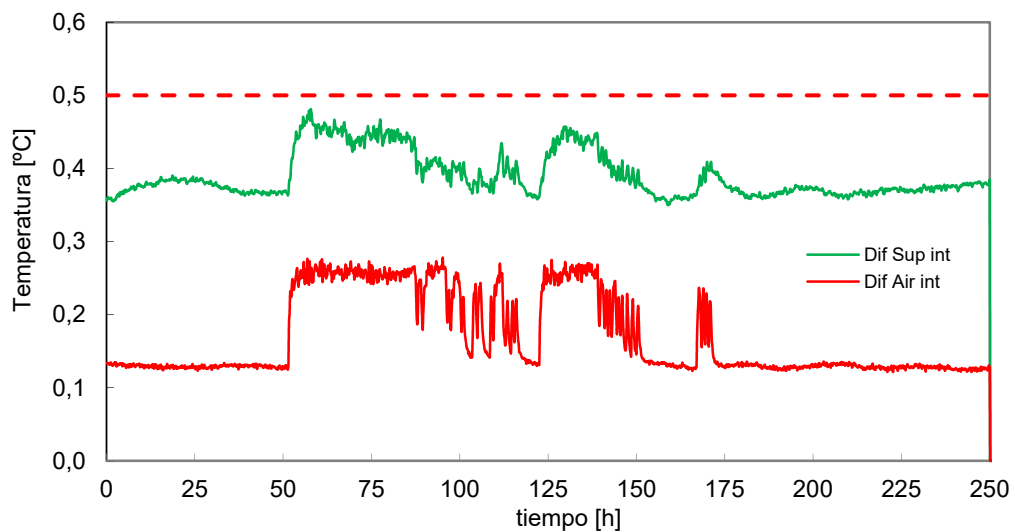


Figura A.16 – Diferencias máximas para las temperaturas de aire y superficie de la sala de ensayos durante la rutina *ROLBS*

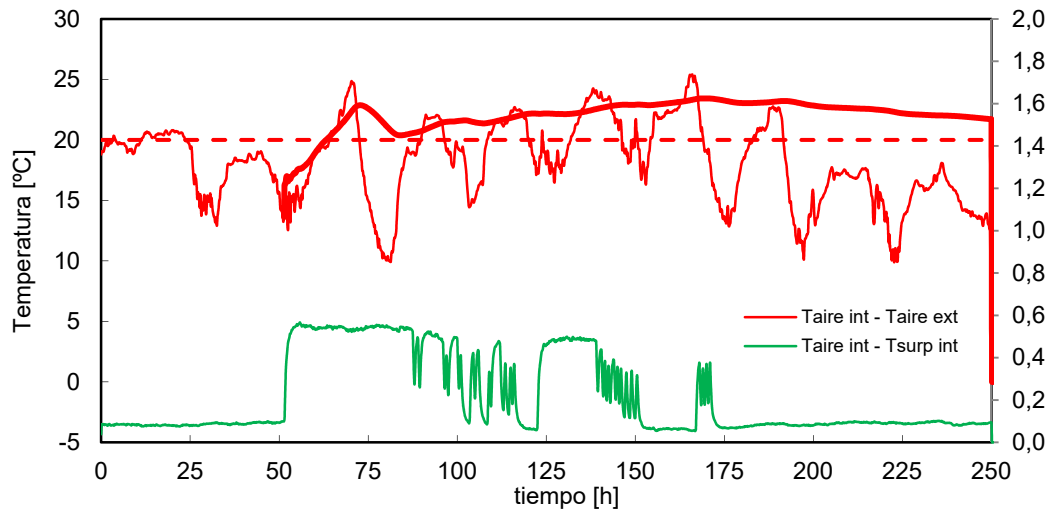


Figura A.17- Salto de temperatura entre el ambiente interior y el exterior, eje izquierdo, y entre ambiente y superficie, eje derecho, durante la rutina ROLBS

A.2.2 Rutina PRBS

De igual forma a análisis realizado anteriormente se evalúa el comportamiento para la rutina PRBS, que permite estudiar la respuesta de la celda para frecuencias medias, de forma que se barre todo el espectro de trabajo.

A.2.2.1 Flujo de la envolvente

En la Figura A.18 se muestran la potencia eléctrica y el flujo de calor en la sala de ensayos para la rutina PRBS, que corresponden con la tercera rutina de ensayo empleada para el proceso de calibración.

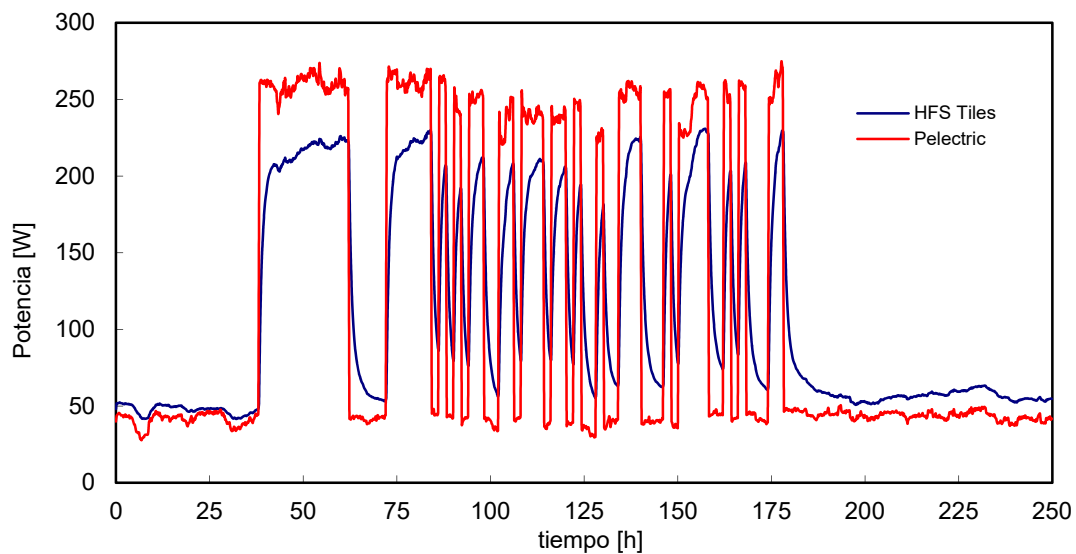


Figura A.18 - Potencia eléctrica de calentamiento y medida del flujo de las HFS Tiles para las rutinas PRBS

En la Figura A.20 se muestran los flujos medios por unidad de superficie que se dan durante este ensayo. Los valores son coherentes con los obtenidos en los anteriores ensayos y con las condiciones de la celda EGUZKI.

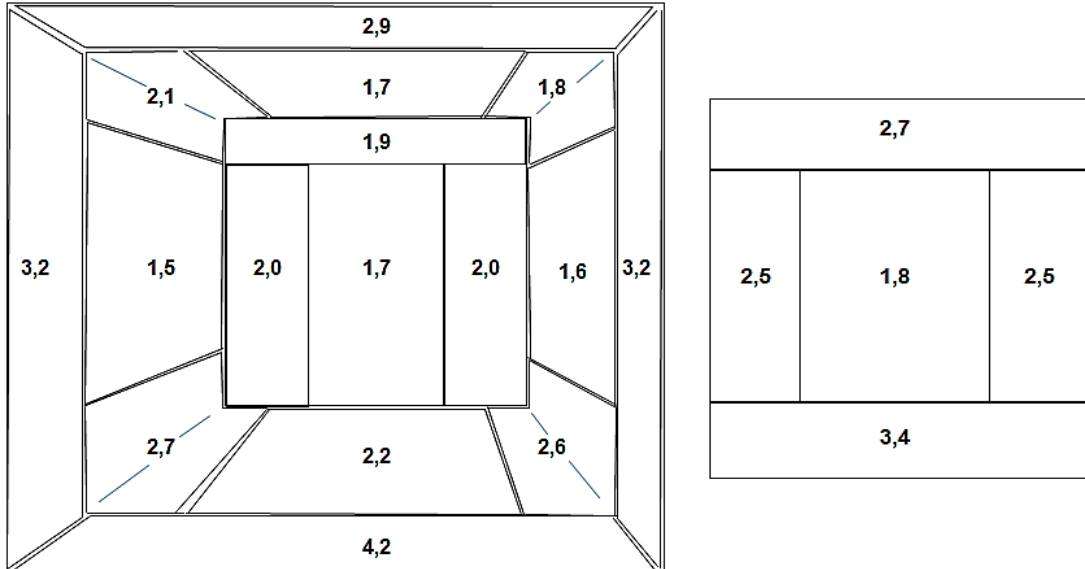


Figura A.19 – Flujos promedio por unidad de superficie en la cara norte, y envoltorio de la sala de ensayos, izquierda, y en el muro de calibración, derecha, para la rutina PRBS

Este mismo comportamiento se obtiene en el análisis de la evolución temporal de cada grupo de *tiles*, así como la evolución de los flujos de borde en las zonas de esquina como se muestra desde la Figura A.20 a la Figura A.30.

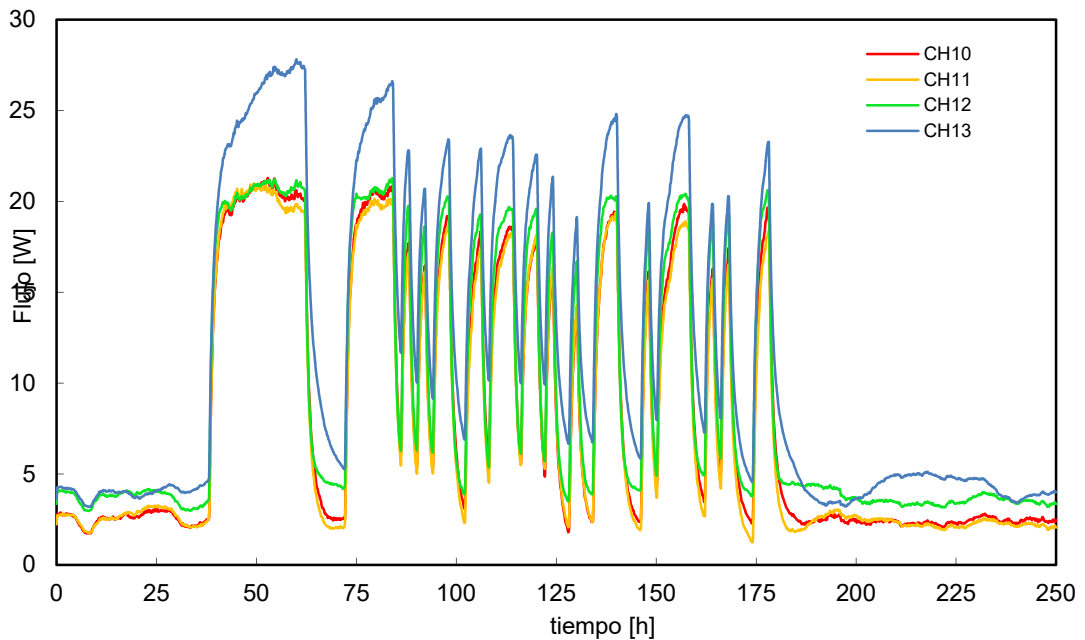


Figura A.20 – Flujo medido por los grupos centrales de la envoltorio de la sala de ensayo

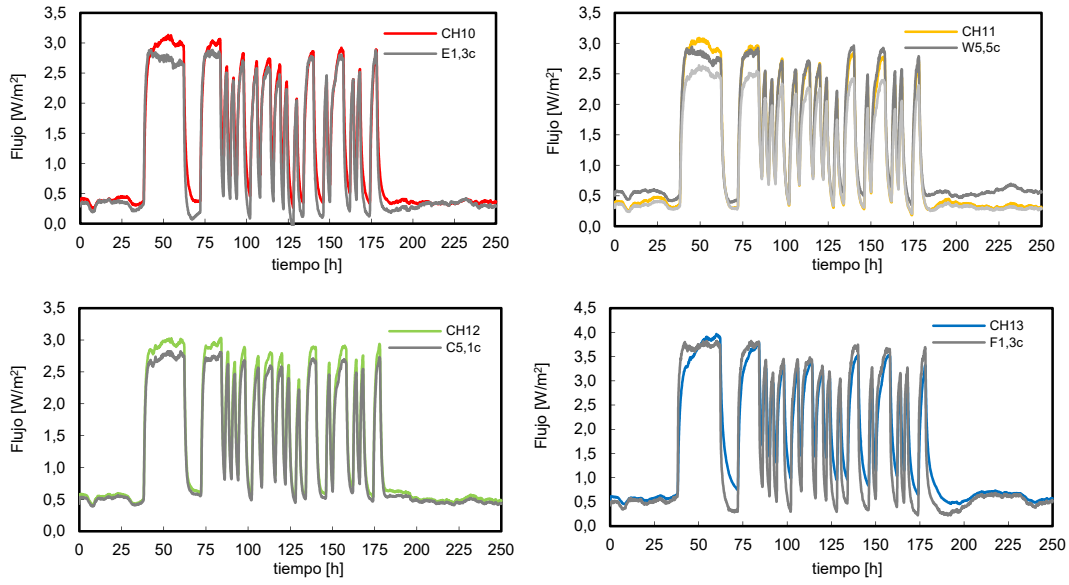


Figura A.21 – Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie de los grupos centrales equivalentes

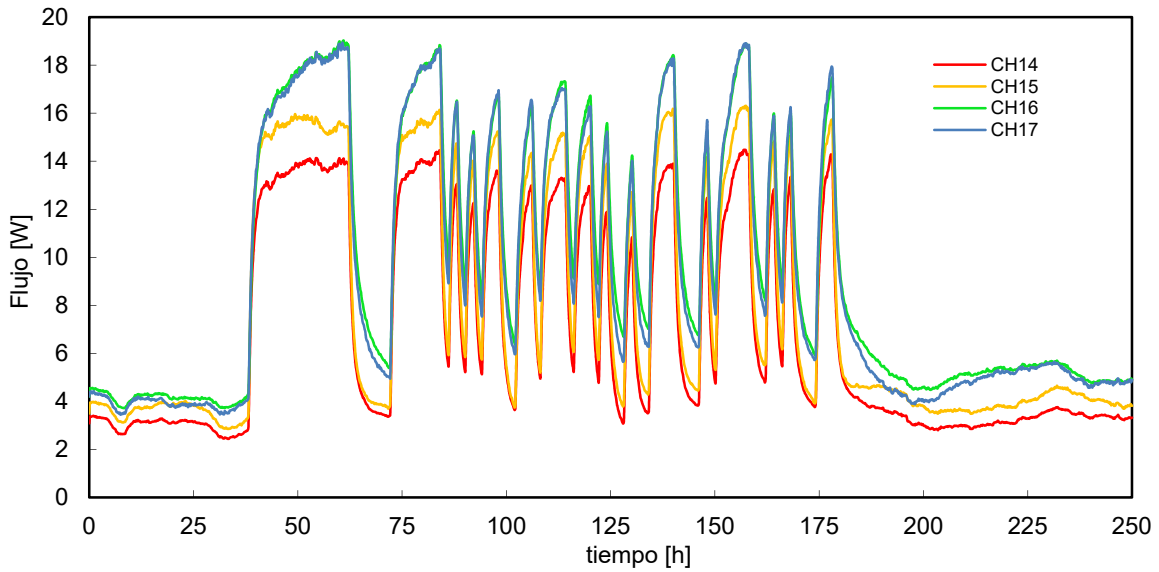


Figura A.22 – Flujo medido por los grupos de borde longitudinales, tipología 1, de la envolvente de la sala de ensayo

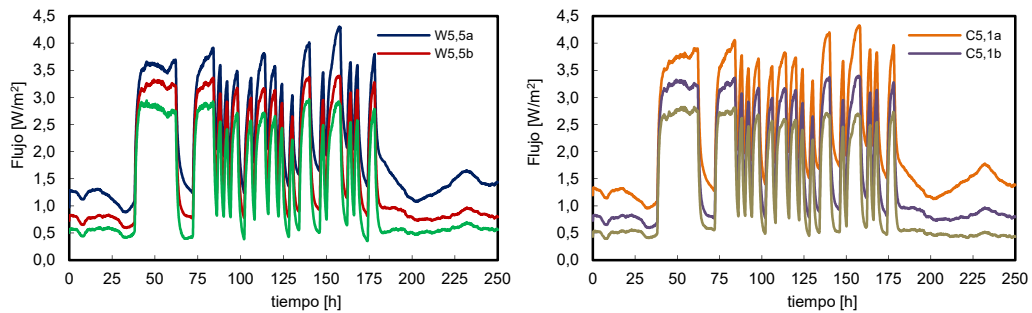


Figura A.23 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde longitudinales, tipología 1

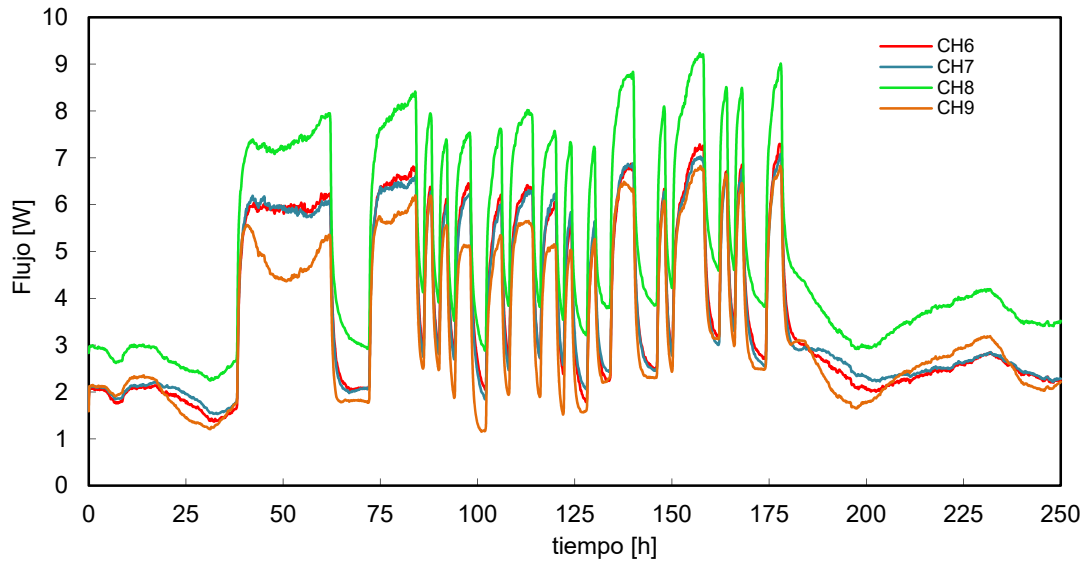


Figura A.24 – Flujo medido por los grupos de borde sur, *tipología 2 y 3*, de la envolvente de la sala de ensayo

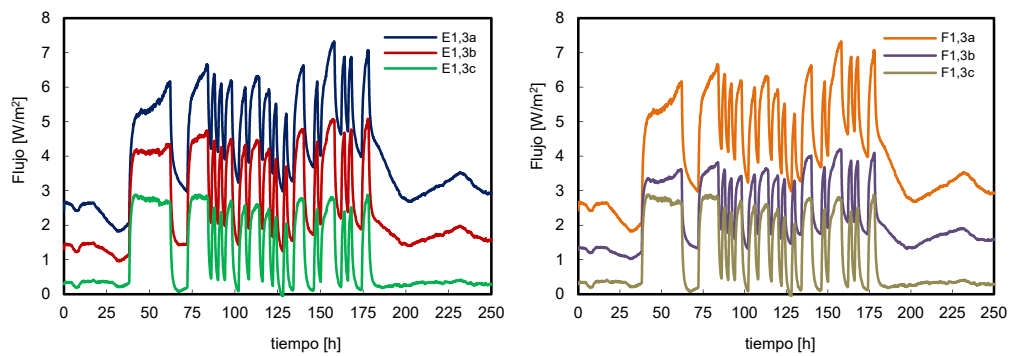


Figura A.25 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde sur, *tipología 2 y 3*

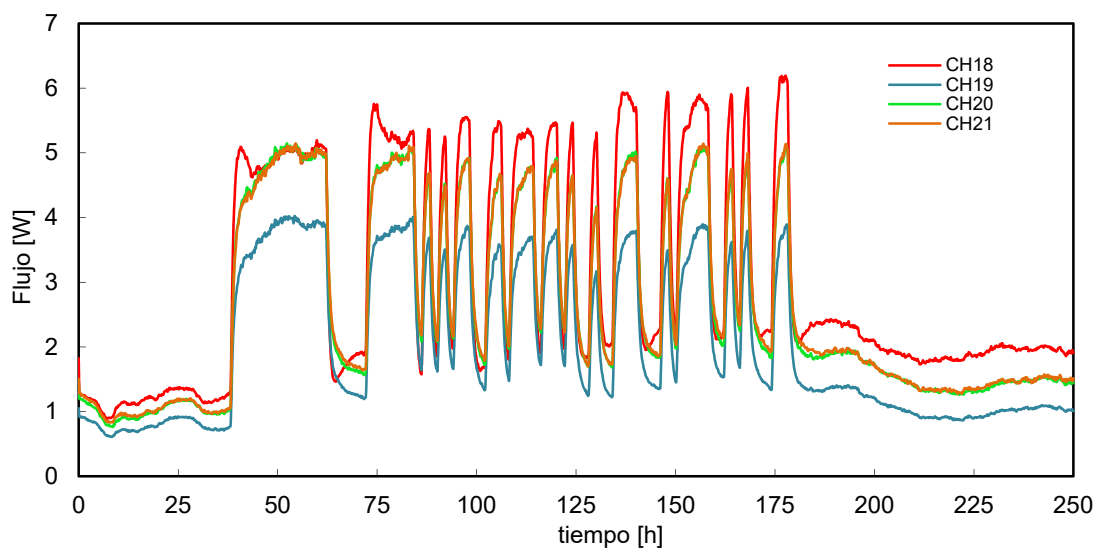


Figura A.26 – Flujo medido por los grupos de borde norte, *tipología 4*, de la envolvente de la sala de ensayo

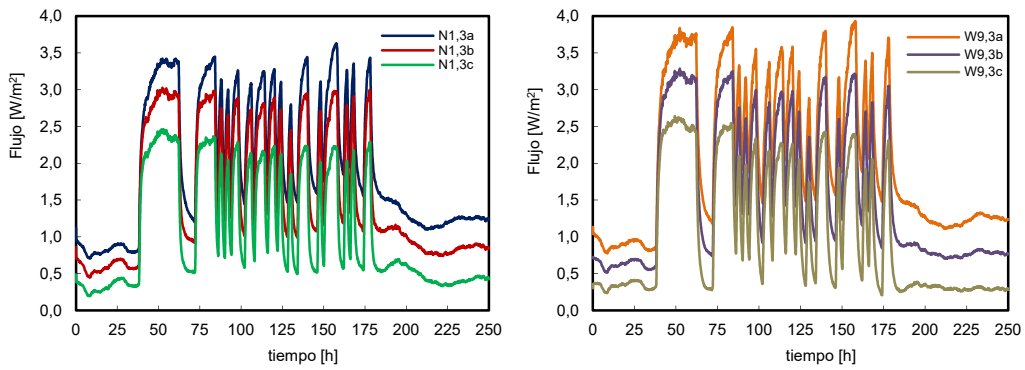


Figura A.27- Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde norte, tipología 4

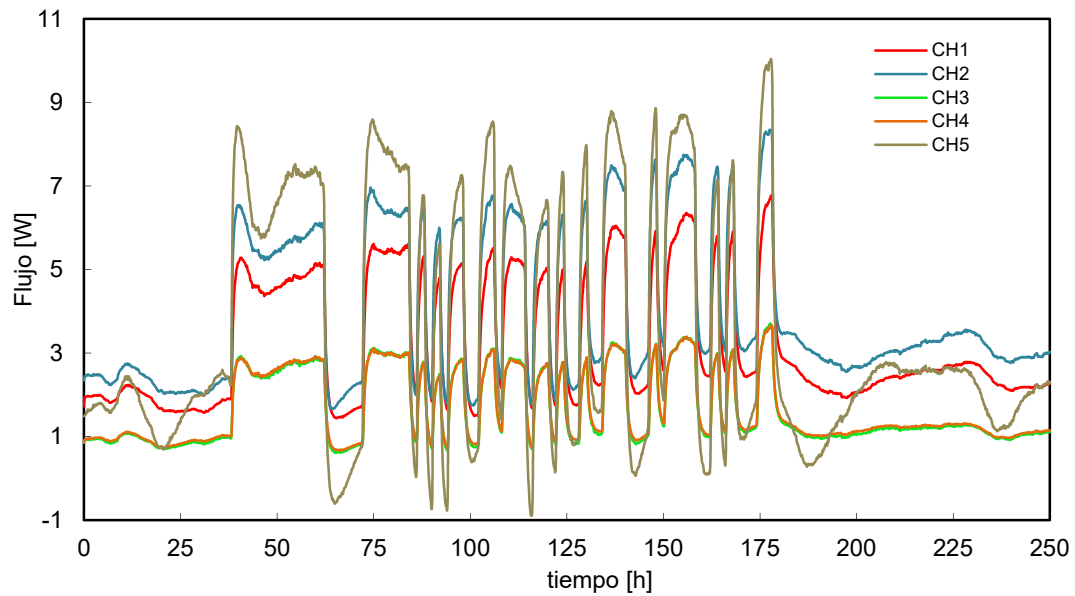


Figura A.28- Flujo medido por los grupos del muro de calibración

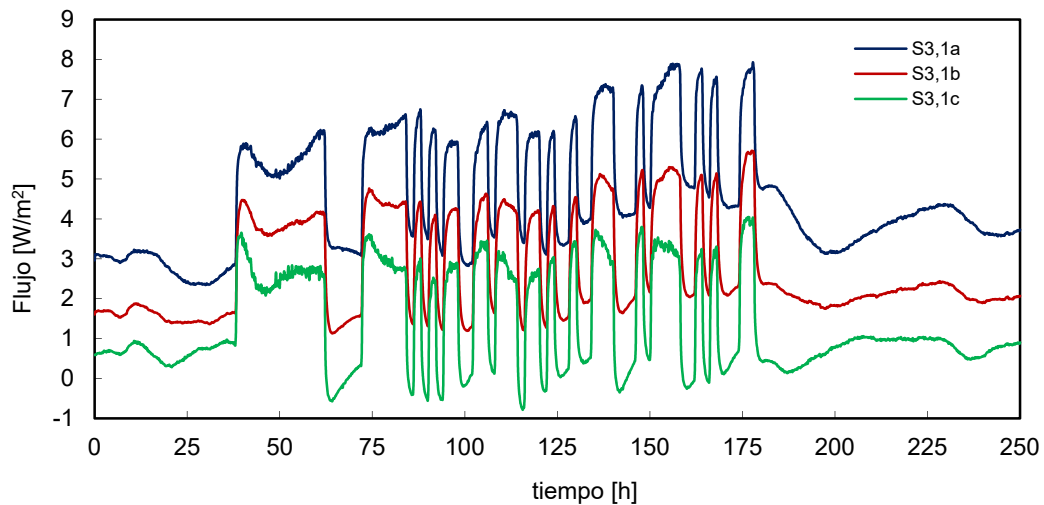


Figura A.29- Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie del grupo central del muro de calibración

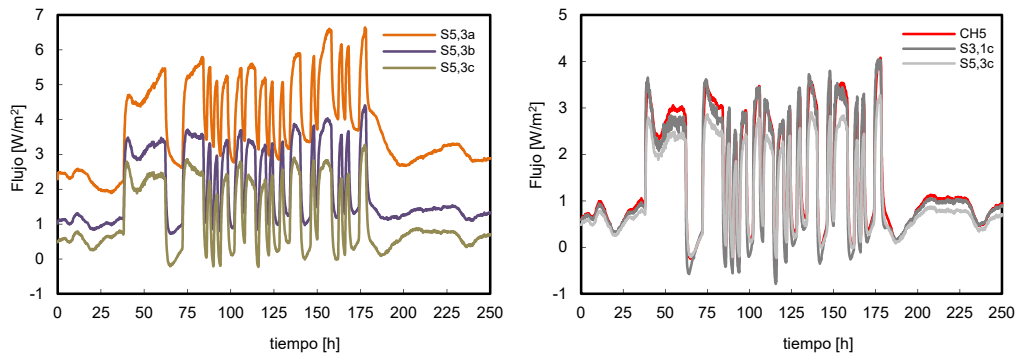


Figura A.30– Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde en el muro de calibración

A.2.2.2 Temperaturas

Como se puede ver en las gráficas que van de la Figura A.31 a la Figura A.33, durante este periodo de ensayo se cumplen las condiciones de homogeneidad de temperaturas en el interior de la sala de ensayos y el salto de temperaturas entre ambientes.

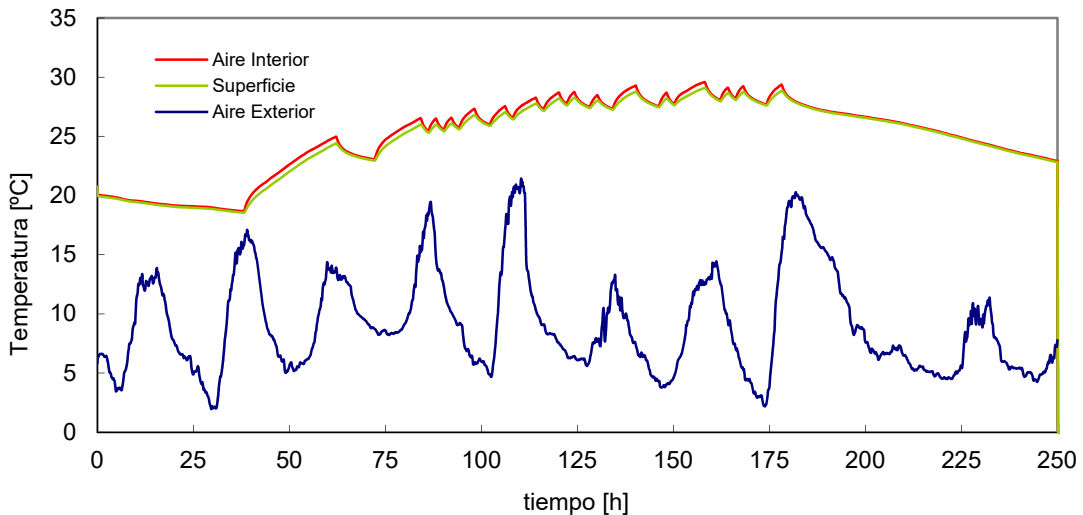


Figura A.31– Temperaturas aire y superficie de sala de ensayos y temperatura exterior ventilada para rutina PRBS

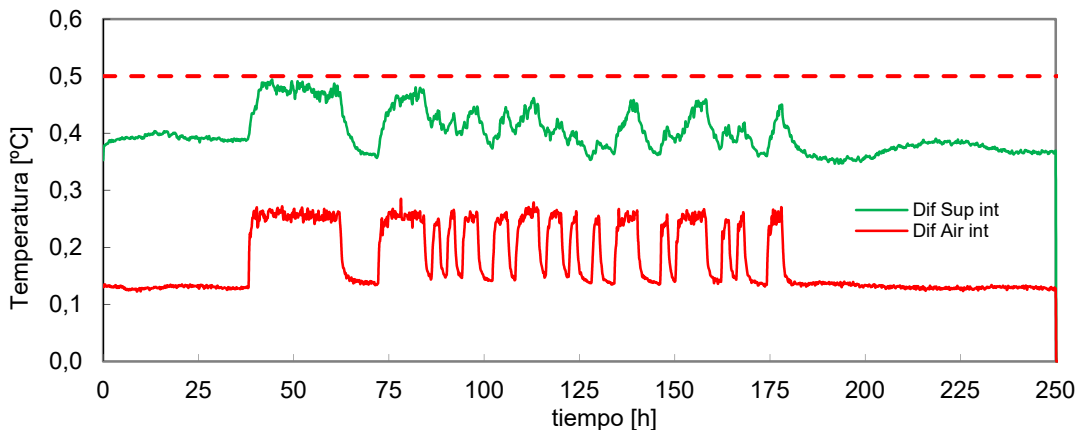


Figura A.32 – Diferencias máximas temperaturas aire y superficie de la sala de ensayos durante la rutina PRBS

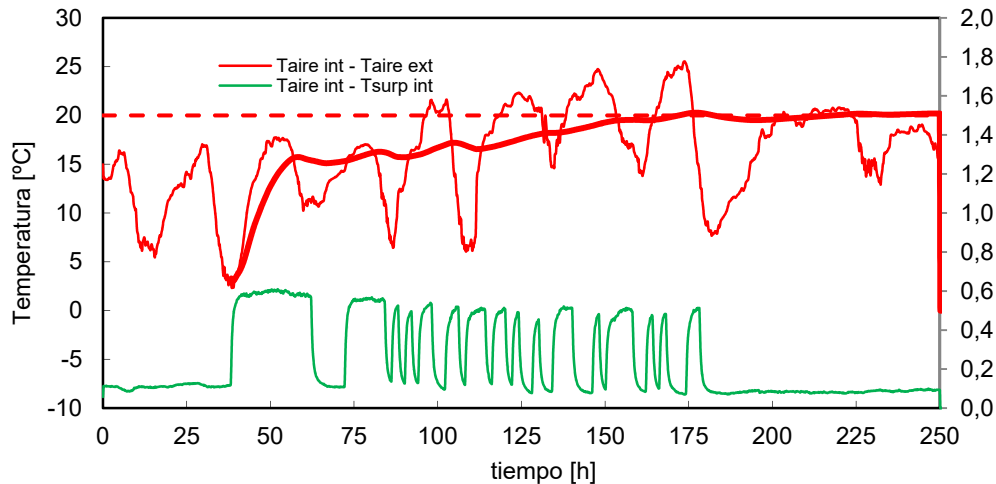


Figura A.33- Salto de temperatura entre el ambiente interior y el exterior, eje izquierdo, y entre ambiente y superficie, eje derecho, durante la rutina PRBS

A.3 Modelos experimentales

Una vez revisada la calidad de los datos se puede pasar a la fase de modelado. No tiene ningún sentido comenzar con el proceso de identificación de parámetros sin antes conocer el comportamiento de la celda y que los datos que se emplean como función objetivo corresponden con los valores que se introducen en el modelo. Es decir, si no se obtiene una homogeneidad adecuada de la temperatura de aire interior es complicado poder conseguir un modelo con residuos que presenten un ajuste adecuado con un único nodo que represente dicho aire interior, por ejemplo. Por tanto, la fase de revisión de los datos experimentales es fundamental para dirigir la selección del modelo adecuado. Proceso que se define a continuación.

A.3.1 Modelo de la celda

Como ya se indica en la memoria, el objetivo de diseño de la celda *PASLINK* es disponer de un equipo de ensayo que se pueda modelar mediante el sistema de parámetros más simple posible. Esto permite disponer mayor potencialidad de análisis en la definición de las muestras bajo ensayo. Para la obtención del modelo representativo de la celda *EGUZKI*, se han analizado los modelos recogidos en la Figura A.34. La elección del modelo definitivo se realiza en base a los resultados obtenidos en los parámetros de la celda, como son la transmitancia y la capacidad térmica, así como mediante el análisis de ajuste a patrón de ruido blanco de los residuos correspondientes a las funciones de objetivo empleadas en el proceso de identificación de parámetros. Para obtener unos resultados más fiables y representativos, el estudio se realiza empleando las tres rutinas de ensayo definidas, de forma que se contempla en los resultados el efecto de la respuesta en frecuencia de la celda. En la Tabla A.1 se recogen los resultados finales del estudio. Los valores de capacidades térmicas, C , están indicados en $[M/K]$ y los de conductancias, H , en $[W/K]$. Los coeficientes de apertura de los flujos de calor, A , son adimensionales.

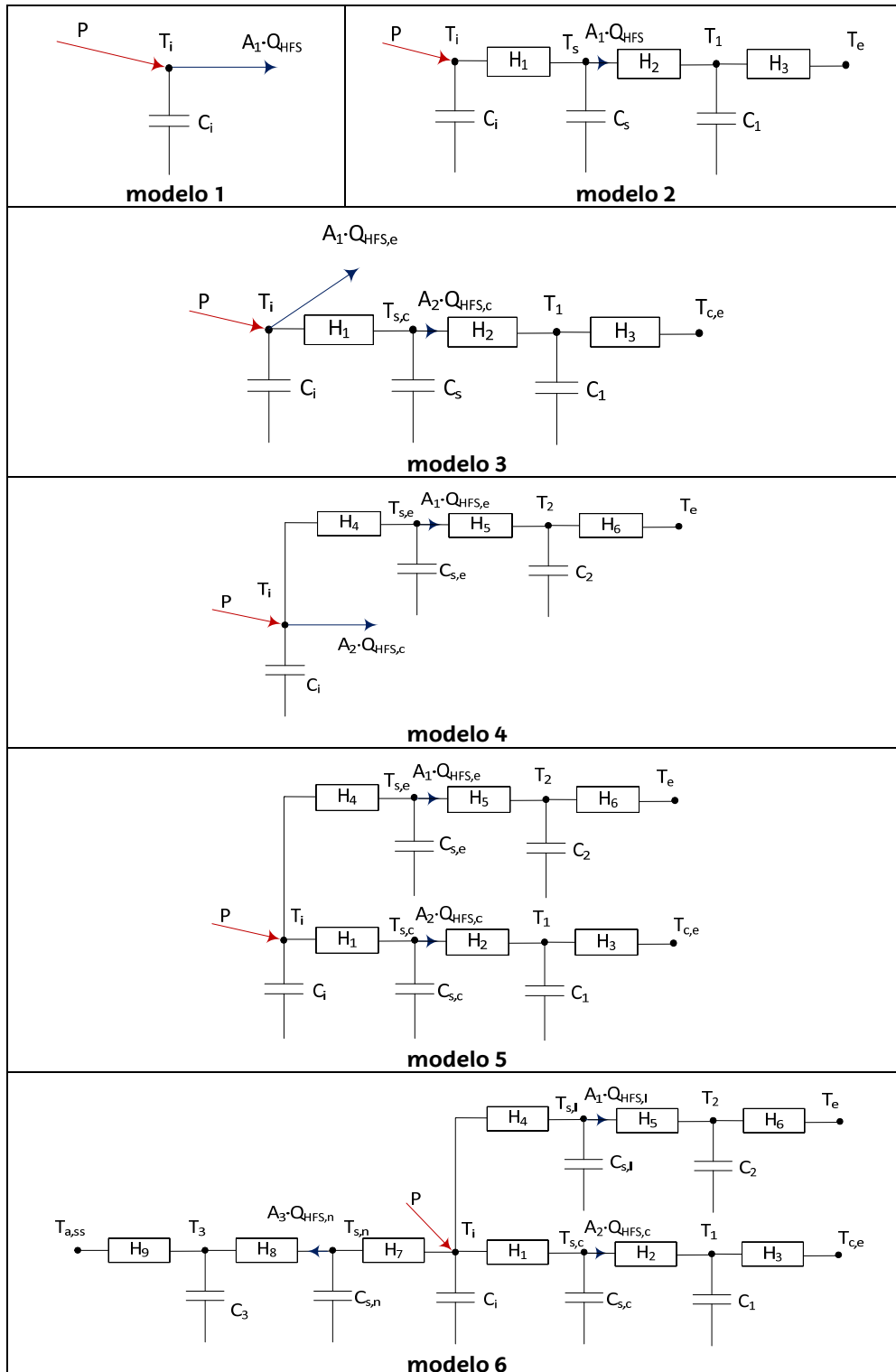


Figura A.34 – Modelos de representación del comportamiento térmico de la celda

En la memoria se realiza un análisis desarrollado del modelo 5, mostrando la definición de las ecuaciones, y estudiando la metodología de validación de los resultados del proceso de identificación de parámetros. A continuación se recogen los resultados totales para todos los modelos y las rutinas de ensayo.

	C_i	C_s	$C_{s,c}$	$C_{s,e}$	C_{cel}	C_c	C_e	H_i	$H_{i,c}$	$H_{i,e}$	H_c	H_e	A_1	A_2	A_3
modelo 1	0,651												1,075		
	0,557												1,060		
	0,595												1,046		
modelo 2	0,028	0,685			5,434			530,4							1,071
	0,324	0,355			5,329			446,6							1,042
	0,009	0,737			5,648			473,6							1,032
modelo 3		0,674	0,055			0,542		457,4	62,8		1,091		1,052	1,118	
		0,683	0,144			0,259		381,5	57,9		0,945		1,072	1,183	
		0,698	0,129			0,232		279,9	45,3		0,841		1,017	1,104	
modelo 4		0,833		0,853			3,973			334,6		5,379	1,038	1,061	
		0,705		0,405			4,992			323,6		5,135	0,983	1,331	
		0,915		0,446			4,555			234,6		3,641	1,066	1,098	
modelo 5	0,024	0,677	0,034	0,643	4,294	0,388	3,905	532,9	82,4	396,1	1,083	6,005	1,033	1,181	
	0,010	0,706	0,256	0,450	5,369	0,293	5,077	539,9	80,4	459,5	1,039	5,790	0,995	1,042	
	0,028	0,823	0,247	0,576	6,203	0,335	5,868	475,0	72,0	379,3	0,948	5,359	0,943	1,161	
modelo 6	0,022	0,750	0,282	0,470	5,871	0,631	5,240	499,1	86,1	346,5	0,906	5,977	1,035	1,176	1,057
	0,094	0,639	0,169	0,564	5,619	0,398	5,220	457,4	82,8	374,6	1,041	5,021	1,083	1,136	1,036
	0,026	0,798	0,193	0,497	5,623	0,260	5,364	364,6	62,2	311,4	0,928	5,821	0,938	1,096	1,084

Tabla A.1 – Resultados completos del proceso de identificación de parámetros en cada modelo, de arriba abajo, se indica el valor obtenido en el análisis de las rutinas PULSO, PRBS y ROLBS, respectivamente

A.3.1.1 Modelo 1

Se trata del modelo más simple, formado por un único nodo que representa el ambiente interior de la celda con una única capacidad térmica, por tanto se trata de un modelo de primer orden. En la ecuación [A.1] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.2] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$[dT_i] = [0][T_i]dt + \left[\frac{1}{C_i} \quad \frac{-A_1}{C_i} \right] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS} \end{bmatrix} dt + [\sigma_i]dW \quad [A.1]$$

$$[T_{im}] = [1][T_i(t)] + [0] \begin{bmatrix} P(t) \\ Q_{HFS}(t) \end{bmatrix} + [s_i]de(t) \quad [A.2]$$

A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas. Lo valores de capacidades térmicas, C , están indicados en $[W_{10min}/K]$, y los valores de conductancias, H , en $[W/K]$.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10.0	20.0	40.0	3.18E+01	4.76E-03	6688.1	0.0024	0.0018
C_i	1.0	1000	2000	1.09E+03	1.03E+00	183.1	-0.0001	0
A_1	0.5	1.0	1.5	1.08E+00	1.04E-03	1083.8	-0.0006	0.0011
σ_i	0.0	0.01	1.0	1.07E-02	3.16E-04	33.8	0	0
s_i	0.0	0.01	1.0	6.83E-06	6.45E-07	10.5	0	0

Tabla A.2 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 1

	T_i	C_i	A_1	σ_i	s_i
T_i	1				
C_i	0.0074	1			
A_1	0.0408	-0.4075	1		
σ_i	0.0317	-0.0565	-0.0547	1	
s_i	0.0024	0.0112	0.0321	-0.5689	1

Tabla A.3 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PULSO* en el modelo 1

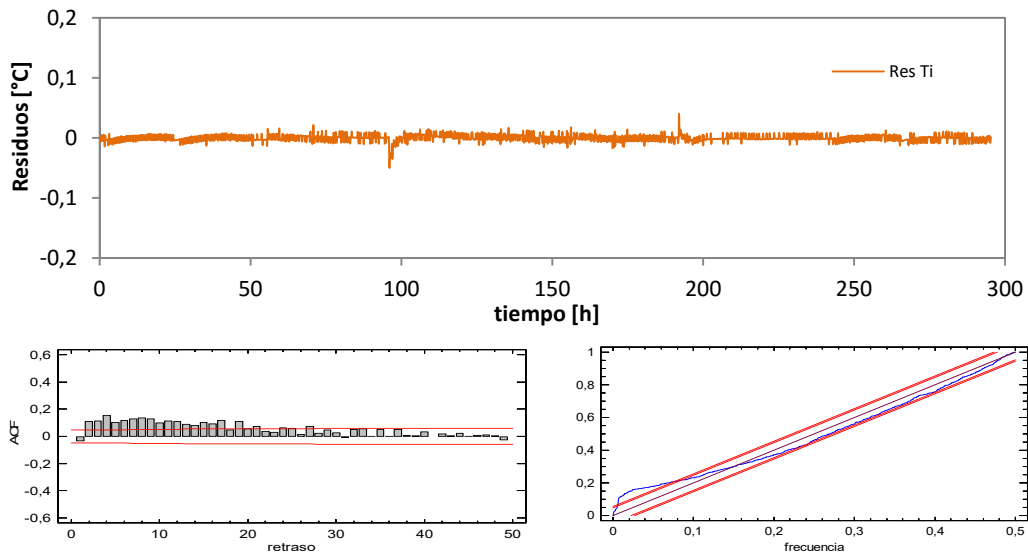


Figura A.35 – Análisis de residuos en el modelo 1 para la excitación *PULSO*

Resultados rutina *PRBS*

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10.0	20.0	40.0	2.08E+01	8.51E-03	2443.7456	0	0
C_i	1.0	1000	2000	9.28E+02	7.10E-01	227.9236	0	0
A_1	0.5	1.0	1.5	1.06E+00	1.46E-03	619.4125	0.0001	0.0001
σ_i	0.0	0.01	1.0	2.06E-02	4.16E-04	49.5406	0	0
s_i	0.0	0.01	1.0	1.04E-16	1.80E-13	0.0006	0	0

Tabla A.4 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PRBS* en el modelo 1

	T_i	C_i	A_1	σ_i	s_i
T_i	1				
C_i	0.0074	1			
A_1	0.0408	-0.4075	1		
σ_i	0.0317	-0.0565	-0.0547	1	
s_i	0.0024	0.0112	0.0321	-0.5689	1

Tabla A.5 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PRBS* en el modelo 1

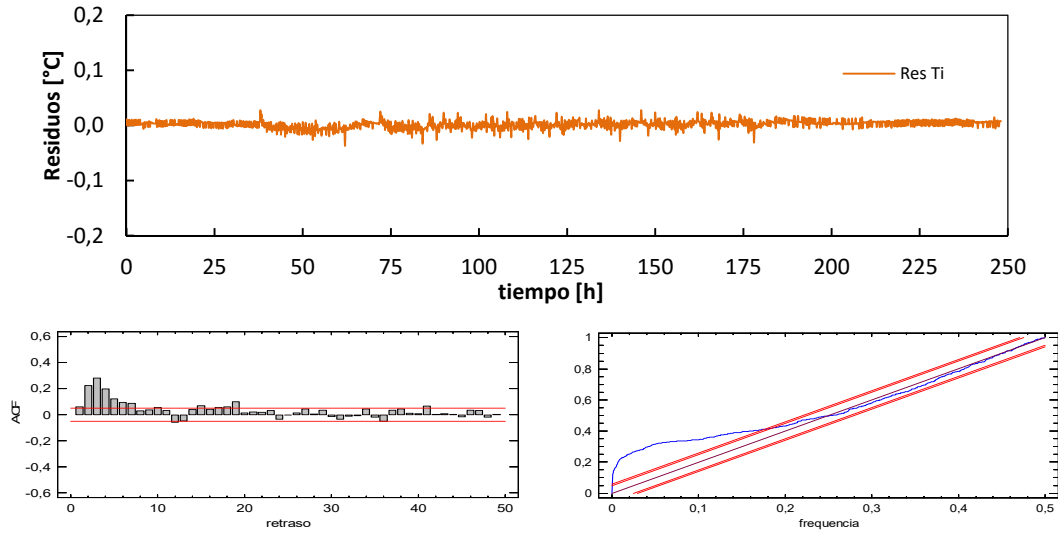


Figura A.36 – Análisis de residuos en el modelo 1 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10.0	20.0	40.0	2.42E+01	1.49E-02	1624.5772	-0.0001	0.0003
C_i	1.0	1000	2000	9.92E+02	1.75E+00	98.4324	0	0
A_1	0.5	1.0	1.5	1.05E+00	4.00E-03	223.458	0	0.0001
σ_i	0.0	0.01	1.0	1.66E-02	2.15E-03	7.7318	0	0
s_i	0.0	0.01	1.0	2.71E-17	4.59E-13	0.0001	0	0

Tabla A.6 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 1

	T_i	C_i	A_1	σ_i	s_i
T_i	1				
C_i	-0.0079	1			
A_1	0.0084	-0.1873	1		
σ_i	0.0889	-0.0089	0.0062	1	
s_i	0.0895	-0.0089	0.0036	0.0006	1

Tabla A.7 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 1

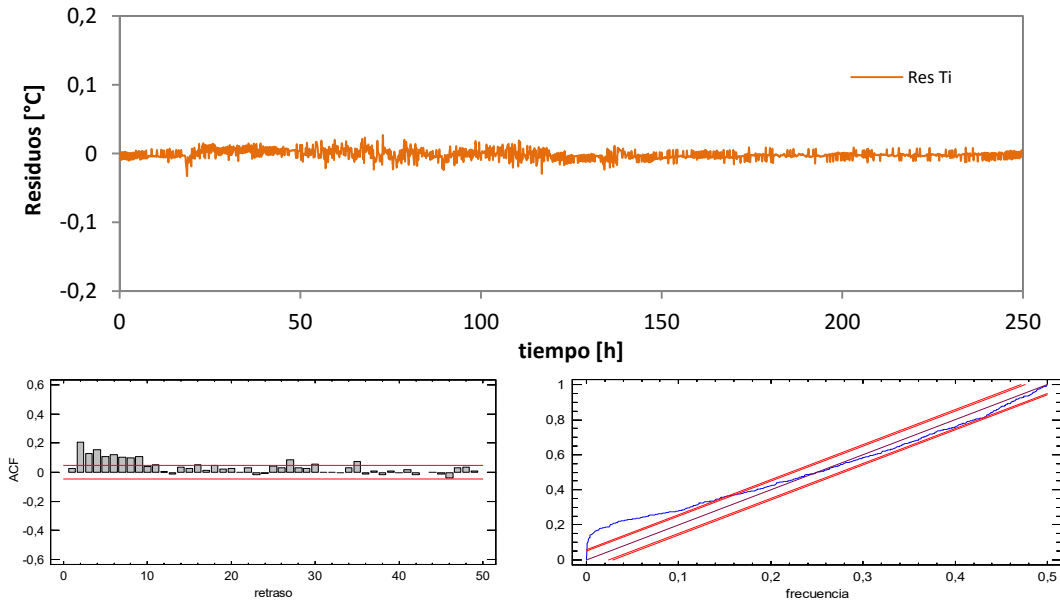


Figura A.37 – Análisis de residuos en el modelo 1 para la excitación ROLBS

A.3.1.2 Modelo 2

En el segundo modelo se hace una diferenciación entre el ambiente interior y la envolvente de la sala de ensayos. El modelo pasa a ser de tercer orden y permite estimar las propiedades térmicas de la estructura de la celda. En la ecuación [A.3] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.4] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_s \\ dT_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{H_1}{c_i} & \frac{-H_1}{c_i} & 0 \\ \frac{H_1}{c_s} & \frac{-(H_1+H_2)}{c_s} & \frac{H_2}{c_s} \\ 0 & \frac{H_2}{c_1} & \frac{-(H_2+H_3)}{c_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_s \\ T_1 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{1}{c_i} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{c_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_e \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \sigma_i & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_s & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 \end{bmatrix} dW \quad [A.3]$$

$$\begin{bmatrix} T_{im} \\ T_{sm} \\ Q_{HFsm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{A_1} & \frac{-H_2}{A_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i(t) \\ T_s(t) \\ T_1(t) \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P(t) \\ T_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_i & 0 & 0 \\ 0 & s_{s,c} & 0 \\ 0 & 0 & s_1 \end{bmatrix} de(t) \quad [A.4]$$

El siguiente nivel de modelado de la celda, aún siendo sencillo, se complica en gran medida respecto a modelo 1. De ahí el interés de obtener un diseño de celda que responda al modelo más sencillo, de forma que se puede emplear toda la potencialidad de las herramientas de identificación de parámetros al estudio de la probeta bajo ensayo. A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	3.18E+01	4.67E-02	680.6374	-0.00188	0.0018
T_s	10	20	40	3.18E+01	5.45E-03	5828.6817	-0.0055	0.0018
T_1	10	20	40	2.93E+01	1.03E-01	284.4967	-0.0073	0.0009
H_1	100	500	1000	5.30E+02	5.50E+00	96.5017	0.00043	0.0002
C_i	1	10	2000	4.67+01	1.59E-01	16.4626	-0.2742	-0.0001
C_s	1	1000	2000	1.14E+03	1.42E+00	134.1095	-0.09257	0.0001
H_2	5	10	500	2.70E+01	1.04E+00	25.8197	0.0029	0
C_1	1000	1500	5000	9.06E+03	4.16E+01	36.2743	-0.0757	-0.0005
H_3	5	10	100	8.68E+00	7.24E-01	11.9897	0.0046	-0.0003
A_1	0.5	1	1.5	1.07E+00	1.49E-03	757.6803	-0.0011	0.0011

Tabla A.8 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 2

	T_i	T_s	T_1	H_1	C_i	C_s	H_2	C_1	H_3	A_1
T_i	1									
T_s	0.27	1								
T_1	-0.34	-0.23	1							
H_1	-0.14	-0.34	0.13	1						
C_i	-0.11	-0.27	0.14	0.18	1					
C_s	-0.26	-0.16	0.31	0.10	0.14	1				
H_2	-0.36	-0.26	0.19	0.14	0.14	0.29	1			
C_1	-0.33	-0.24	0.24	0.11	0.24	0.19	0.26	1		
H_3	-0.13	-0.34	0.11	0.19	0.16	0.36	0.12	0.13	1	
A_1	-0.25	-0.17	0.28	0.10	0.19	-0.16	0.32	0.31	0.10	1

Tabla A.9 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 2

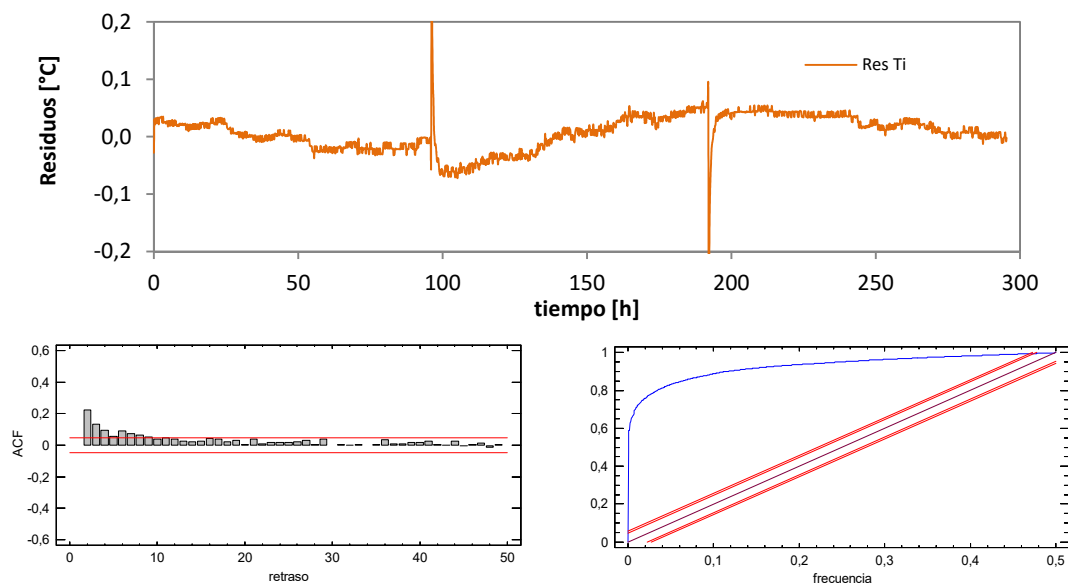


Figura A.38 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PULSO

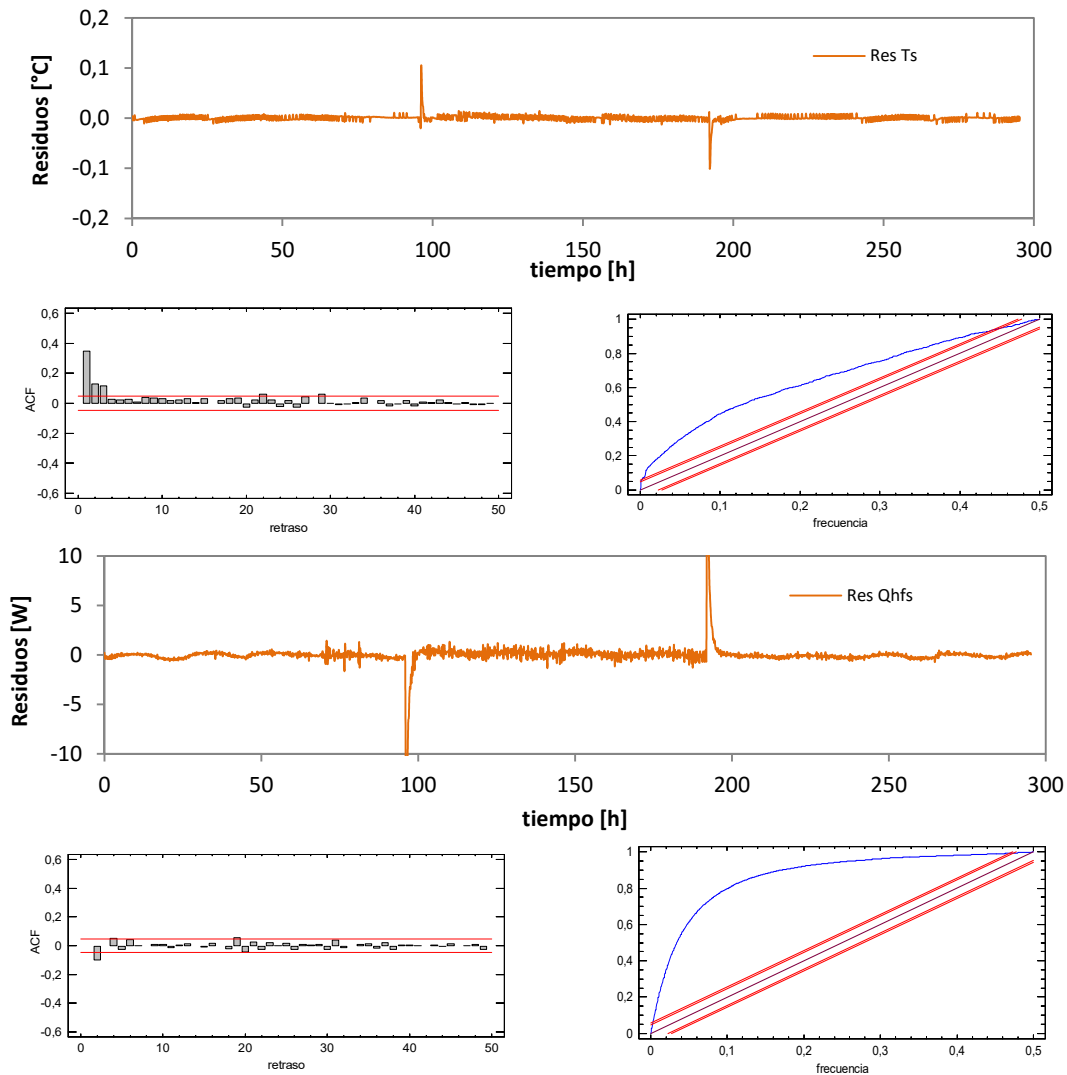


Figura A.39 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	1.99E+01	5.61E-02	354.9914	0.0066	0
T_s	10	20	40	2.07E+01	1.66E-02	1242.2585	-0.0097	0
T_1	10	20	40	2.04E+01	6.15E-02	331.4612	0.0007	0
H_1	100	500	1000	4.47E+02	1.34E+00	334.1442	0.0005	0.0001
C_i	1	10	2000	5.40E+02	1.13E+00	79.6618	0.0008	0.009
C_s	1	1000	2000	5.91E+02	1.67E+00	58.9762	0.0001	-0.0002
H_2	5	10	500	1.76E+02	3.50E+00	50.2624	0	0.0001
C_1	1000	5000	10000	8.88E+03	1.64E+01	39.3346	0	-0.0015
H_3	5	10	100	6.45E+00	1.24E-01	52.2507	0	-0.0015
A_1	0.5	1	1.5	1.04E+00	1.17E-03	760.5452	0.0017	0.0001

Tabla A.10 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 2

	T_i	T_s	T_1	H_1	C_i	C_s	H_2	C_1	H_3	A_1
T_i	1									
T_s	0.19	1								
T_1	0.09	0.48	1							
H_1	-0.05	0.02	0.01	1						
C_i	0.12	0.03	0.01	-0.25	1					
C_s	-0.11	-0.03	0.00	0.30	-0.89	1				
H_2	0.08	-0.05	0.08	-0.04	0.12	-0.10	1			
C_1	-0.01	0.02	0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.12	1		
H_3	-0.08	0.03	0.00	0.04	-0.03	0.01	-0.04	-0.02	1	
A_1	-0.01	0.02	0.01	0.16	0.11	-0.25	0.09	0.05	0.08	1

Tabla A.11 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 2

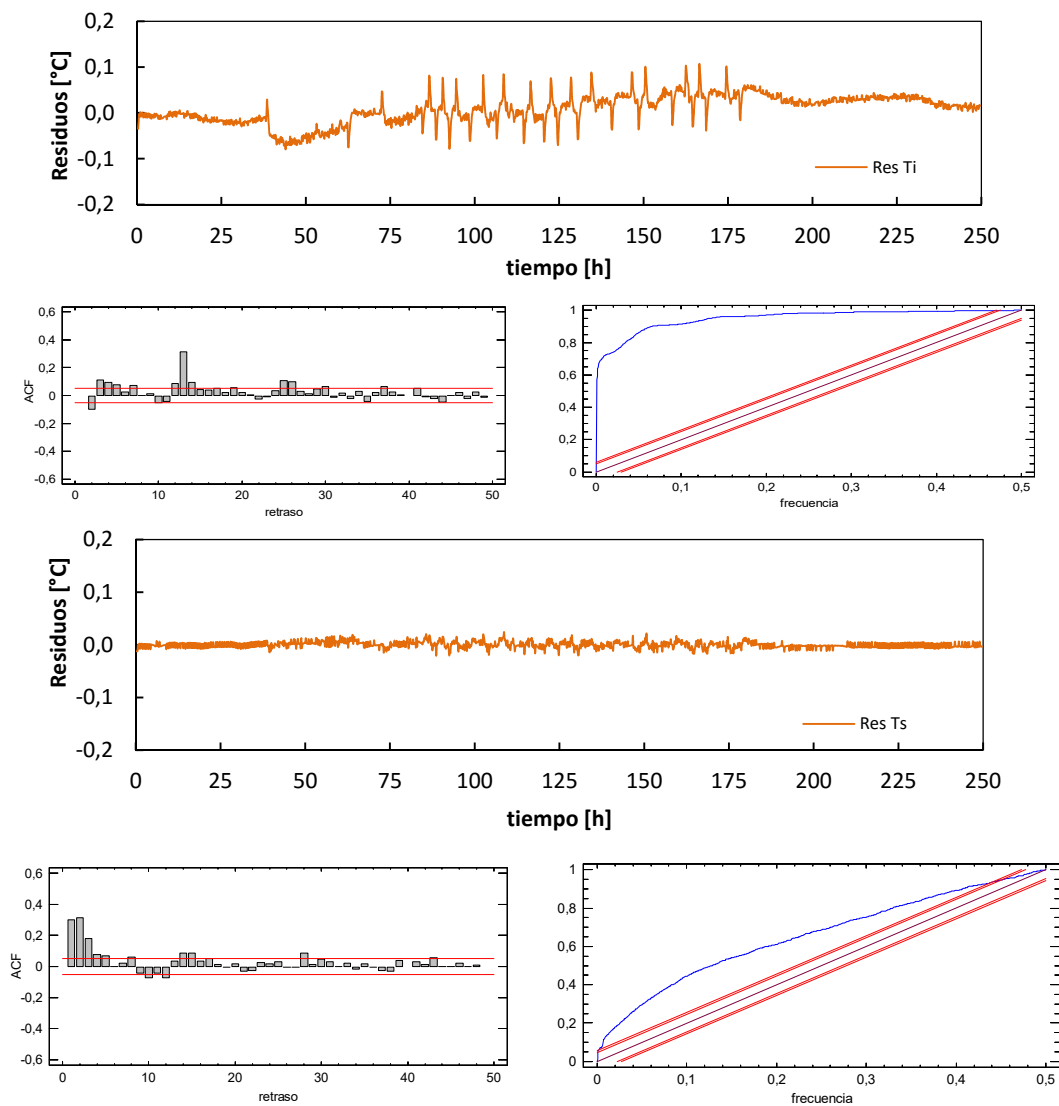


Figura A.40 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PRBS

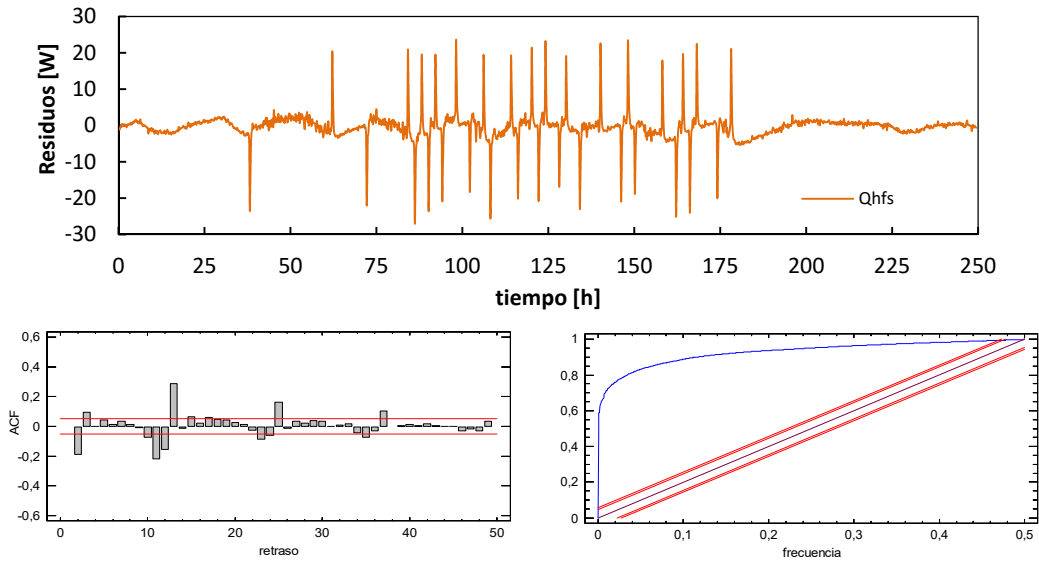


Figura A.41 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.42E+01	1.36E-02	1780.8776	0.0066	0
T_s	10	20	40	2.41E+01	4.70E-03	5128.6979	-0.0097	0
T_1	10	20	40	2.38E+01	1.79E-02	1331.7085	0.0007	0
H_1	100	500	1000	4.74E+02	1.20E+00	396.1788	0.0005	0.0001
C_i	1	10	2000	1.50E+01	1.50E+00	63.0633	0.0008	0.009
C_s	1	1000	2000	1.23E+03	2.17E+00	53.7641	0.0001	-0.0002
H_2	5	10	500	2.10E+02	5.35E+00	39.3135	0	0.0001
C_1	1000	5000	10000	9.41E+03	1.96E+01	37.6009	0	-0.0015
H_3	5	10	100	6.74E+00	1.13E-01	59.8046	0	-0.0015
A_1	0.5	1	1.5	1.03E+00	1.19E-03	740.8563	0.0017	0.0001

Tabla A.12 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 2

	T_i	T_s	T_1	H_1	C_i	C_s	H_2	C_1	H_3	A_1
T_i	1									
T_s	0.34	1								
T_1	0.09	0.42	1							
H_1	0.00	0.02	-0.02	1						
C_i	0.01	0.00	0.03	-0.19	1					
C_s	-0.03	0.00	-0.04	0.22	-0.84	1				
H_2	0.02	0.00	0.43	-0.01	0.16	-0.17	1			
C_1	-0.01	-0.01	-0.02	0.02	-0.02	0.01	-0.07	1		
H_3	0.01	0.03	0.04	0.01	0.03	-0.02	0.02	0.14	1	
A_1	0.00	-0.01	0.01	0.27	0.05	-0.19	0.09	0.02	0.10	1

Tabla A.13 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 2

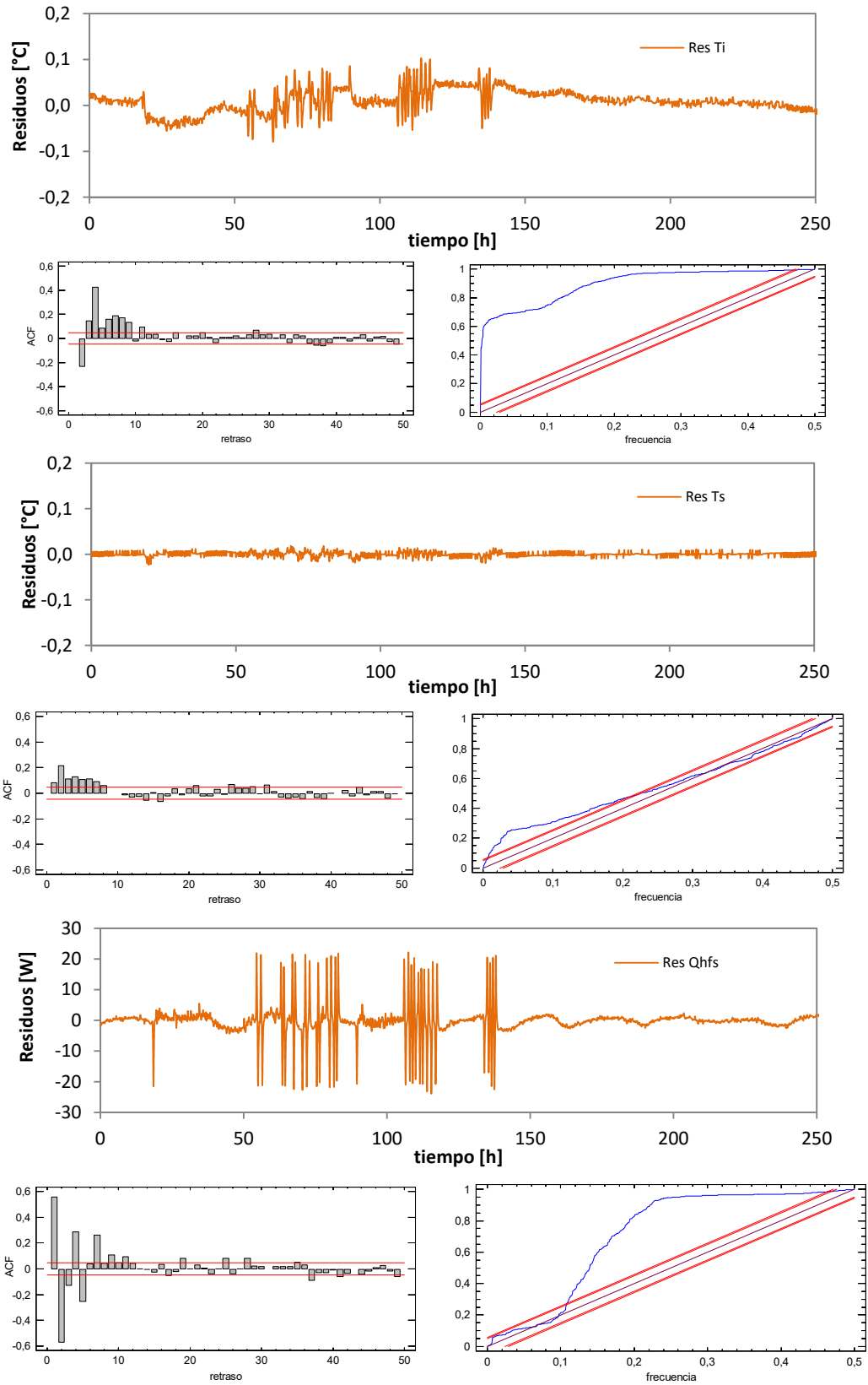


Figura A.42 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación ROLBS

A.3.1.3 Modelo 3

Tras analizar los resultados del modelo 2, se puede ver que aunque los residuos son pequeños en todas las variables objetivo, el ajuste al patrón de ruido blanco no es muy correcto. Esto se puede deber a la diferencia en el comportamiento del muro de calibración respecto al resto de la envolvente de la sala de ensayos. Aunque la superficie de dicho muro de calibración es un porcentaje pequeño, el flujo es muy superior debido a que presenta mayores efectos de puentes térmicos, esto además también afecta a las temperaturas superficiales del mismo, que se diferencian de las temperaturas del resto de la envolvente. Para verificar este comportamiento previsto se define el modelo 3. En el cual se hace una discretización del flujo y temperatura de la envolvente propia de la sala de ensayos y del muro de calibración por separado. En la ecuación [A.5] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.6] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{H_1}{C_i} & \frac{H_1}{C_i} & 0 \\ \frac{H_1}{C_{s,c}} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_{s,c}} \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & -(H_2 + H_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} 1 & -\frac{A_1}{C_i} & 0 \\ \frac{1}{C_i} & \frac{-A_1}{C_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt \quad [A.5]$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,c}^m \\ Q_{HFS,c}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{A_2} & \frac{-H_2}{A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} + [e] \quad [A.6]$$

A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	3.18E+01	6.07E-03	5242.4619	0.0035	0.0018
$T_{s,c}$	10	20	40	3.18E+01	4.35E-03	7309.1254	-0.0099	0.0018
T_1	10	20	40	2.85E+01	1.95E-01	146.5964	0.0018	0.0008
H_1	1	50	500	6.28E+01	2.80E+00	22.2818	-0.0006	0
C_i	10	1000	2000	9.57E+02	3.05E+01	58.8331	0.0007	0.0082
$C_{s,c}$	1	50	500	9.17E+01	2.96E+00	5.1764	0.0001	-0.0005
H_2	0.1	10	1000	3.66E+00	2.61E-01	14.0308	0	0
C_1	1	1000	2000	9.03E+02	1.05E+01	14.3876	0	0
H_3	0.1	6	100	1.55E+00	1.06E-01	14.7018	-0.0001	0
A_1	1	1.2	1.5	1.05E+00	7.96E-03	139.1471	0.0077	-0.0085
A_2	0.5	1	1.5	1.12E+00	5.21E-02	24.5885	0.0022	0.0039

Tabla A.14 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 3

	T_i	$T_{s,c}$	T_1	H_1	C_i	$C_{s,c}$	H_2	C_1	H_3	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,c}$	0.21	1									
T_1	0.00	0.01	1								
H_1	-0.04	0.01	0.02	1							
C_i	0.09	0.01	-0.03	0.01	1						
$C_{s,c}$	-0.11	-0.01	0.01	0.36	-0.29	1					
H_2	-0.01	0.00	0.27	0.18	0.07	0.15	1				
C_1	-0.01	0.00	-0.15	0.17	0.06	0.15	0.20	1			
H_3	-0.02	0.00	-0.50	0.18	0.11	0.13	-0.07	0.23	1		
A_1	0.01	-0.01	0.01	-0.30	-0.17	-0.24	-0.19	-0.18	-0.20	1	
A_2	-0.01	0.01	-0.01	0.31	0.15	0.25	0.19	0.18	0.20	-0.33	1

Tabla A.15 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PULSO* en el modelo 3

En las tablas de resultados y coeficientes de covarianza no se muestran los datos correspondientes al comportamiento estadístico de las variables de estado, $[\sigma]$, y el error de las funciones objetivo, $[e]$, ya que aumenta en gran medida la dimensión de dichas tablas, sí que se analiza en la validación del modelo.

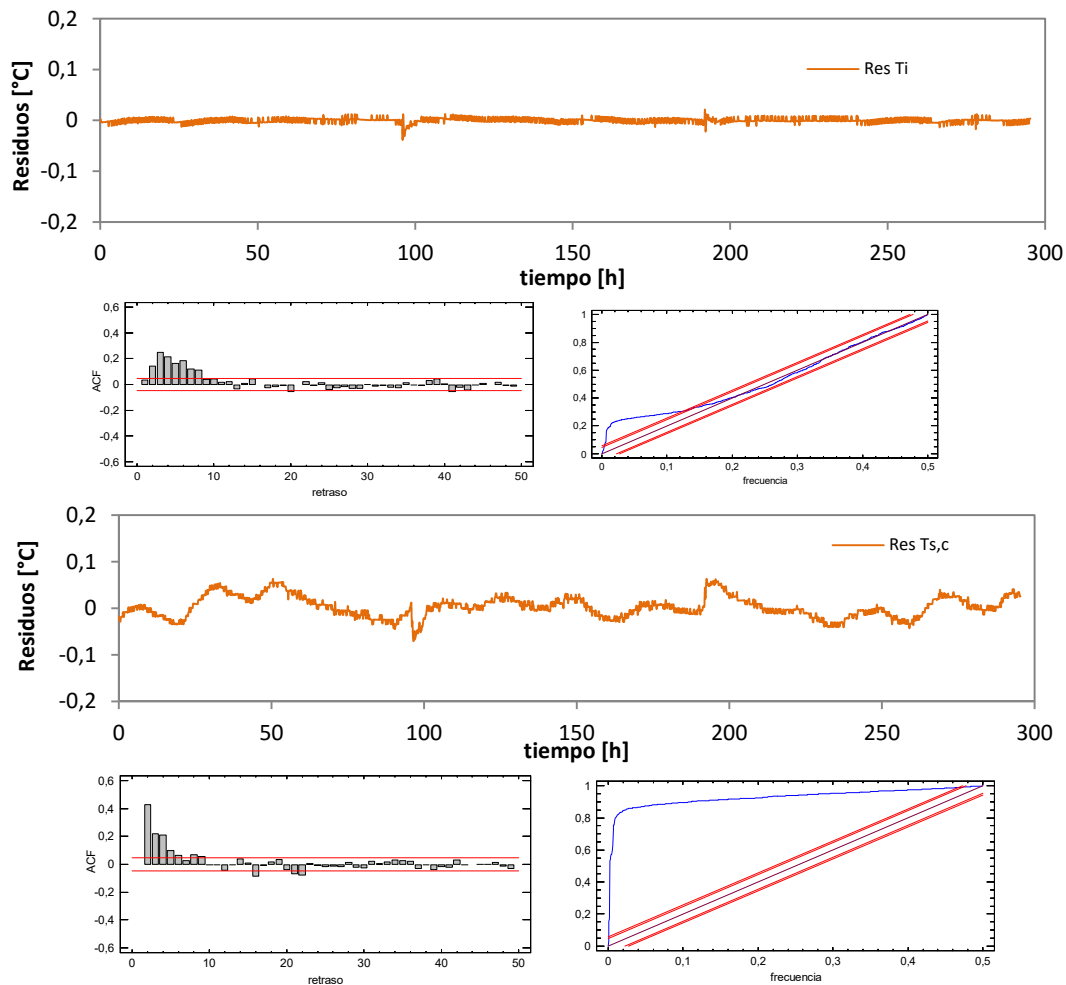


Figura A.43 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación *PULSO*

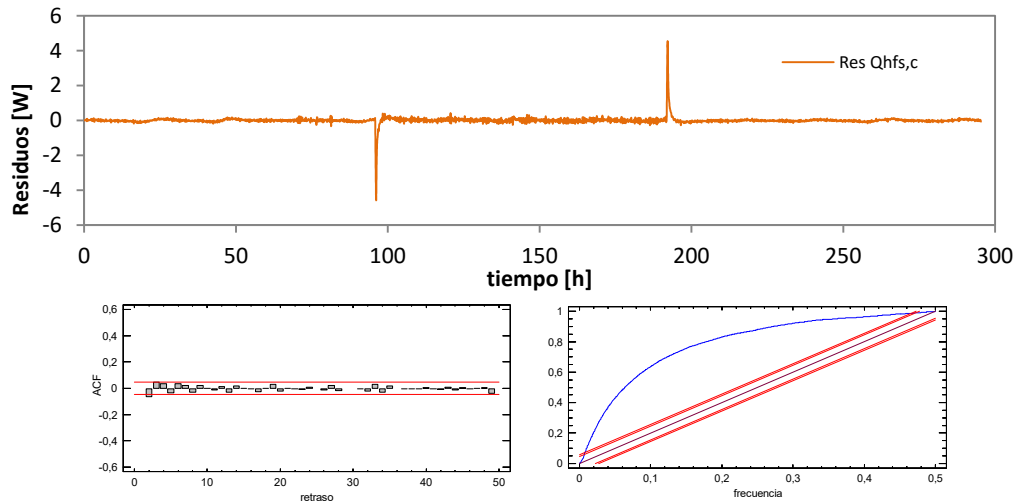


Figura A.44 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.08E+01	6.53E-03	3182.0883	-0.0005	0
$T_{s,c}$	10	20	40	2.07E+01	2.63E-02	785.3445	-0.0005	0
T_1	10	20	40	2.03E+01	3.39E-02	597.7475	0.0002	0
H_1	1	50	500	5.79E+01	1.81E+00	32.066	-0.0001	0
C_i	10	1000	2000	9.72E+02	7.47E-01	210.1	-0.0006	0.0016
$C_{s,c}$	1	50	500	2.40E+02	1.98E+00	20.1673	0	0
H_2	0.1	10	1000	1.70E+01	5.70E-01	29.9114	0	0
C_1	1	1000	2000	4.32E+02	4.16E+00	17.3047	0	0
H_3	0.1	6	100	1.00E+00	2.58E-02	28.078	0	0
A_1	1	1.2	1.5	1.07E+00	4.24E-03	215.8239	-0.0004	0.0001
A_2	0.5	1	1.5	1.18E+00	2.09E-02	32.0907	0.0001	-0.001

Tabla A.16 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 3

	T_i	$T_{s,c}$	T_1	H_1	C_i	$C_{s,c}$	H_2	C_1	H_3	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,c}$	0.11	1									
T_1	0.01	0.08	1								
H_1	0.03	0.02	-0.20	1							
C_i	-0.01	-0.05	0.04	-0.26	1						
$C_{s,c}$	0.03	0.04	-0.18	0.22	-0.47	1					
H_2	0.01	0.05	0.19	0.40	-0.21	-0.02	1				
C_1	0.01	0.03	-0.11	0.21	-0.40	0.32	0.40	1			
H_3	-0.02	0.01	-0.14	0.42	-0.21	0.07	0.07	0.43	1		
A_1	-0.04	-0.02	0.22	-0.32	0.23	-0.20	-0.35	-0.21	-0.38	1	
A_2	0.02	0.03	-0.18	0.29	-0.25	0.35	0.18	0.23	0.17	-0.28	1

Tabla A.17 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 3

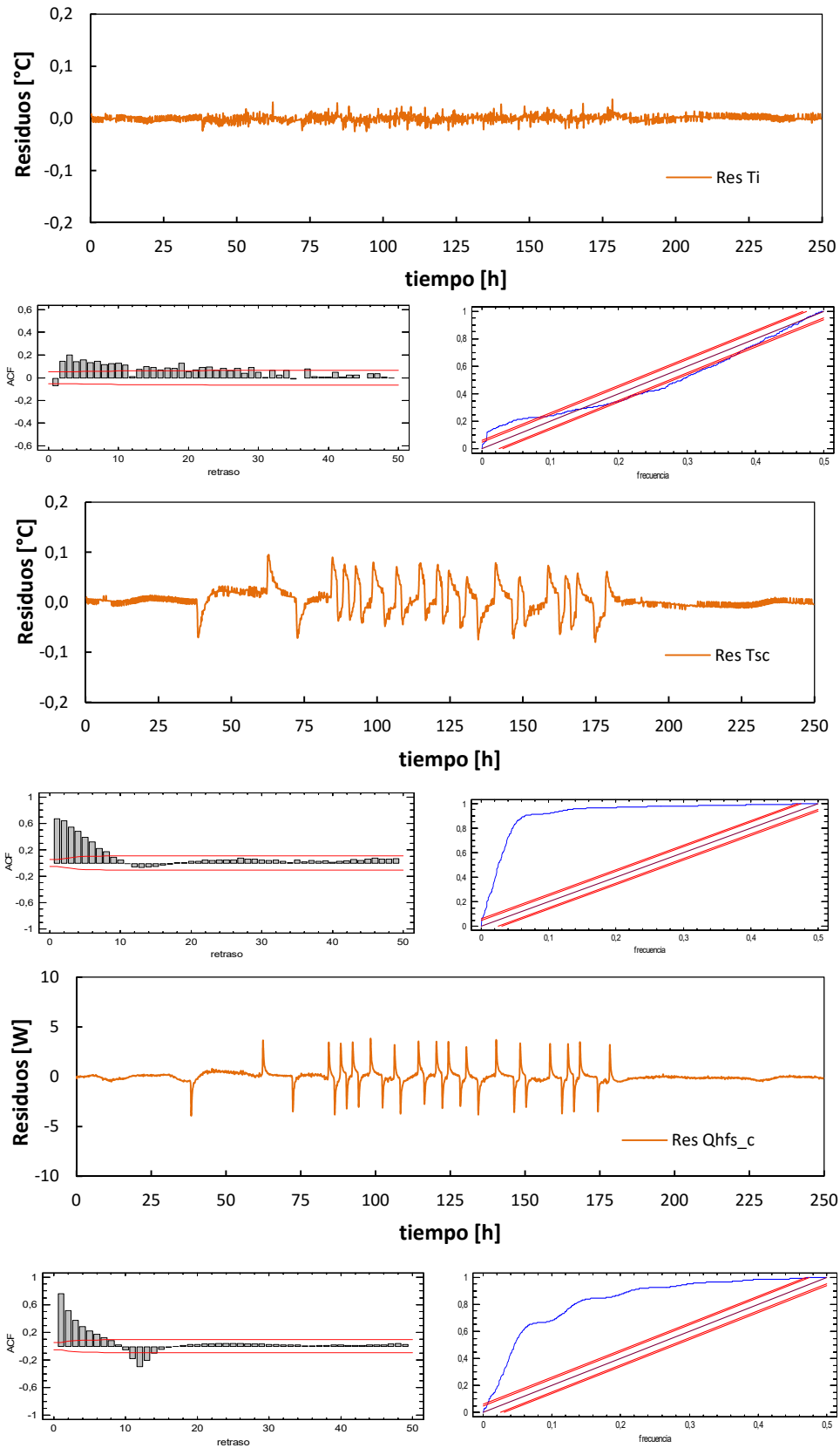


Figura A.46 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.42E+01	5.78E-03	4188.7538	-0.0042	0.0003
$T_{s,c}$	10	20	40	2.41E+01	1.47E-02	1636.5513	-0.004	0.0003
T_1	10	20	40	2.36E+01	4.05E-02	583.6111	0	0.0002
H_1	1	50	500	4.53E+01	4.54E+00	9.9741	-0.0003	0
C_i	10	1000	2000	9.97E+02	1.06E+00	156.074	0.0001	0.0027
$C_{s,c}$	1	50	500	2.15E+02	3.60E+00	9.9292	0	0
H_2	0.1	10	1000	1.41E+01	1.59E+00	8.8728	-0.0001	0
C_1	1	1000	2000	3.87E+02	7.36E+00	8.7735	0	0
H_3	0.1	6	100	8.94E-01	6.60E-02	9.3378	0	0
A_1	1	1.2	1.5	1.02E+00	1.01E-02	93.5165	0.0001	0.0002
A_2	0.5	1	1.5	1.10E+00	5.25E-02	9.8373	0.0004	-0.0961

Tabla A.18 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 3

	T_i	$T_{s,c}$	T_1	H_1	C_i	$C_{s,c}$	H_2	C_1	H_3	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,c}$	0.07	1									
T_1	0.01	0.06	1								
H_1	-0.08	-0.17	-0.01	1							
C_i	0.05	0.12	-0.02	-0.25	1						
$C_{s,c}$	-0.08	-0.18	-0.01	0.32	-0.24	1					
H_2	-0.07	-0.15	0.26	0.30	-0.23	0.28	1				
C_1	-0.07	-0.15	-0.02	0.29	-0.22	0.27	0.26	1			
H_3	-0.07	-0.16	0.00	0.31	-0.23	0.30	0.28	0.28	1		
A_1	0.08	0.18	0.01	-0.33	0.24	-0.32	-0.29	-0.28	-0.31	1	
A_2	-0.08	-0.18	0.00	0.33	-0.25	0.32	0.30	0.29	0.31	-0.33	1

Tabla A.19 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 3

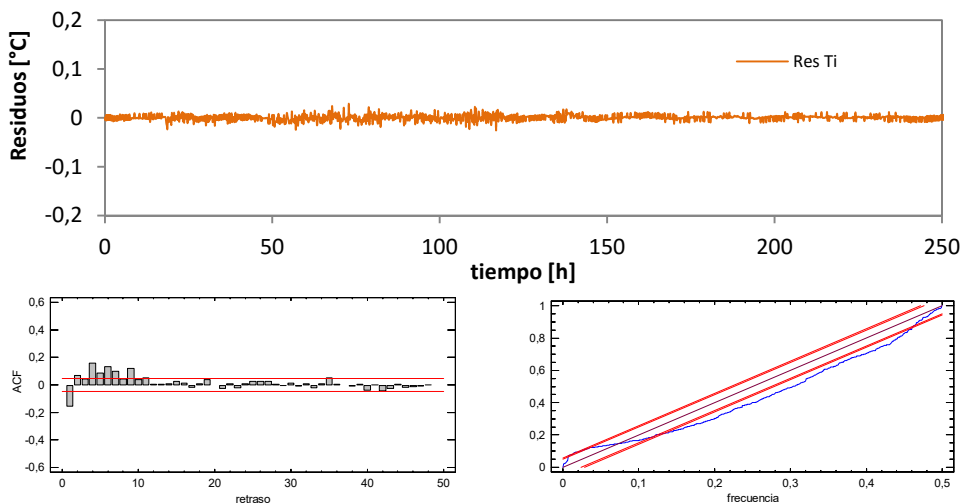


Figura A.47 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación ROLBS

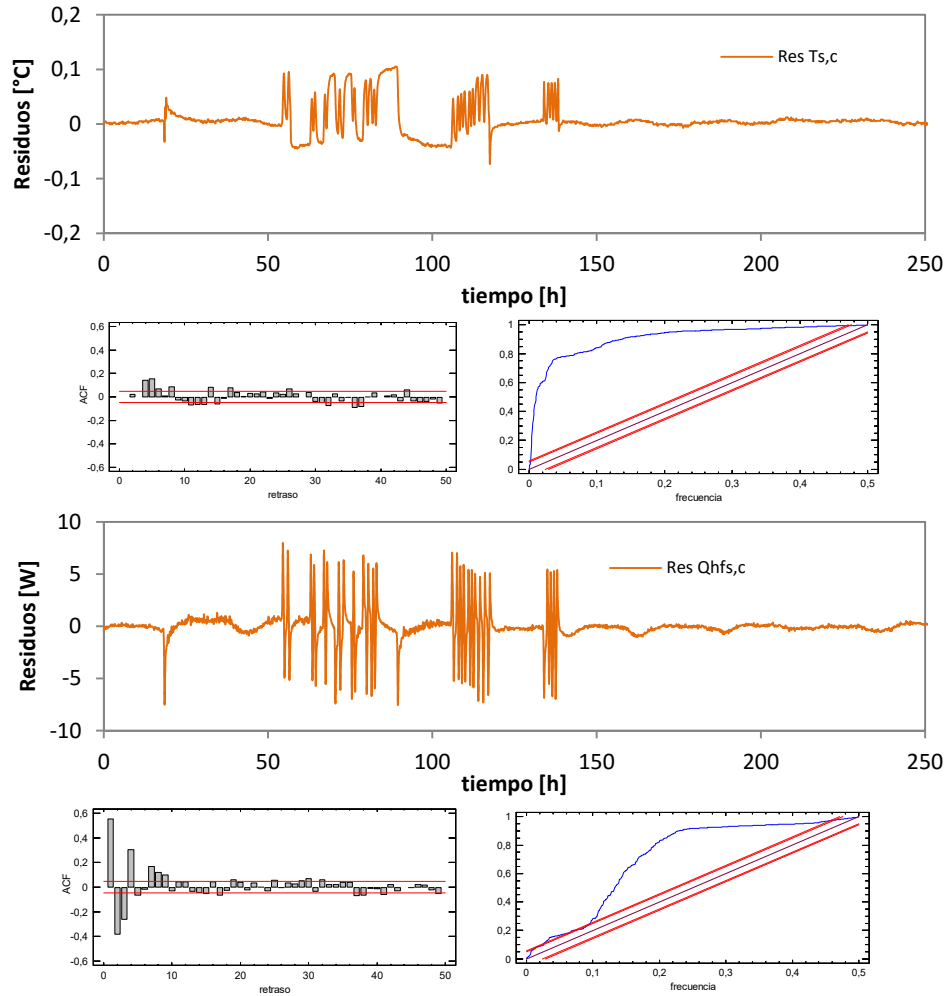


Figura A.48 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación ROLBS

A.3.1.4 Modelo 4

El modelo 4 es un modelo idéntico al modelo 3 pero que intercambia los flujos de calor empleados como variable de entrada y función objetivo. Ahora se emplea el flujo de calor a través del muro de calibración, $Q_{HFS,c}$, como variable de excitación del modelo y el flujo de la envolvente, $Q_{HFS,e}$, como función de ajuste. Esto permite estimar las propiedades térmicas de la envolvente propia de la sala de ensayos. En la ecuación [A.7] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.8] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,e} \\ dT_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{H_1}{C_i} & \frac{H_1}{C_i} & 0 \\ \frac{H_1}{C_{s,e}} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_{s,e}} \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & -(H_2 + H_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,e} \\ T_1 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & -\frac{A_2}{C_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,c} \\ T_e \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt \quad [A.7]$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,e}^m \\ Q_{HFS,e}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{A_1} & \frac{-H_2}{A_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,e} \\ T_1 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,c} \\ T_e \end{bmatrix} + [e] \quad [A.8]$$

A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T _i	10	20	40	3.18E+01	2.06E-02	1548.1391	-0.006	0.0018
T _{s,e}	10	20	40	3.18E+01	3.60E-03	8841.3479	-0.0071	0.0018
T ₂	10	20	40	2.87E+01	3.47E-02	827.2679	-0.0053	0.0008
H ₄	10	500	1000	3.35E+02	8.23E-01	406.431	0	0
C _i	1	100	500	3.05E+02	7.96E-03	212.8658	-0.009	-0.0004
C _{s,e}	10	1000	3000	1.42E+03	1.46E-01	1618.785	-0.0072	0.0018
H ₅	1	10	1000	1.44E+01	8.67E-02	166.4019	-0.0979	0
C ₂	1	5000	10000	6.62E+03	2.47E+00	446.071	0.0002	0.0001
H ₆	1	6	100	8.58E+00	1.09E-01	49.2945	-0.0009	0
A ₁	0.5	1.2	1.5	1.04E+00	1.89E-02	145.4758	-0.0005	0.0002
A ₂	0.5	1.2	1.5	1.06E+00	2.90E-03	304.334	-0.0252	0.0004

Tabla A.20 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 4

	T _i	T _{s,e}	T ₂	H ₄	C _i	C _{s,e}	H ₅	C ₂	H ₆	A ₁	A ₂
T _i	1										
T _{s,e}	0.13	1									
T ₂	-0.02	0.07	1								
H ₄	0.03	-0.11	-0.40	1							
C _i	0.02	-0.05	-0.40	-0.04	1						
C _{s,e}	0.02	-0.01	0.19	0.31	-0.46	1					
H ₅	0.01	0.06	0.21	-0.25	-0.25	0.45	1				
C ₂	0.04	0.02	0.44	0.05	-0.20	0.24	0.26	1			
H ₆	-0.04	0.04	-0.03	-0.01	-0.32	-0.37	-0.01	-0.42	1		
A ₁	-0.03	0.09	0.41	-0.27	0.04	-0.25	0.21	-0.03	-0.02	1	
A ₂	0.01	-0.15	-0.43	0.26	-0.01	0.24	-0.20	0.05	-0.04	-0.31	1

Tabla A.21 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 4

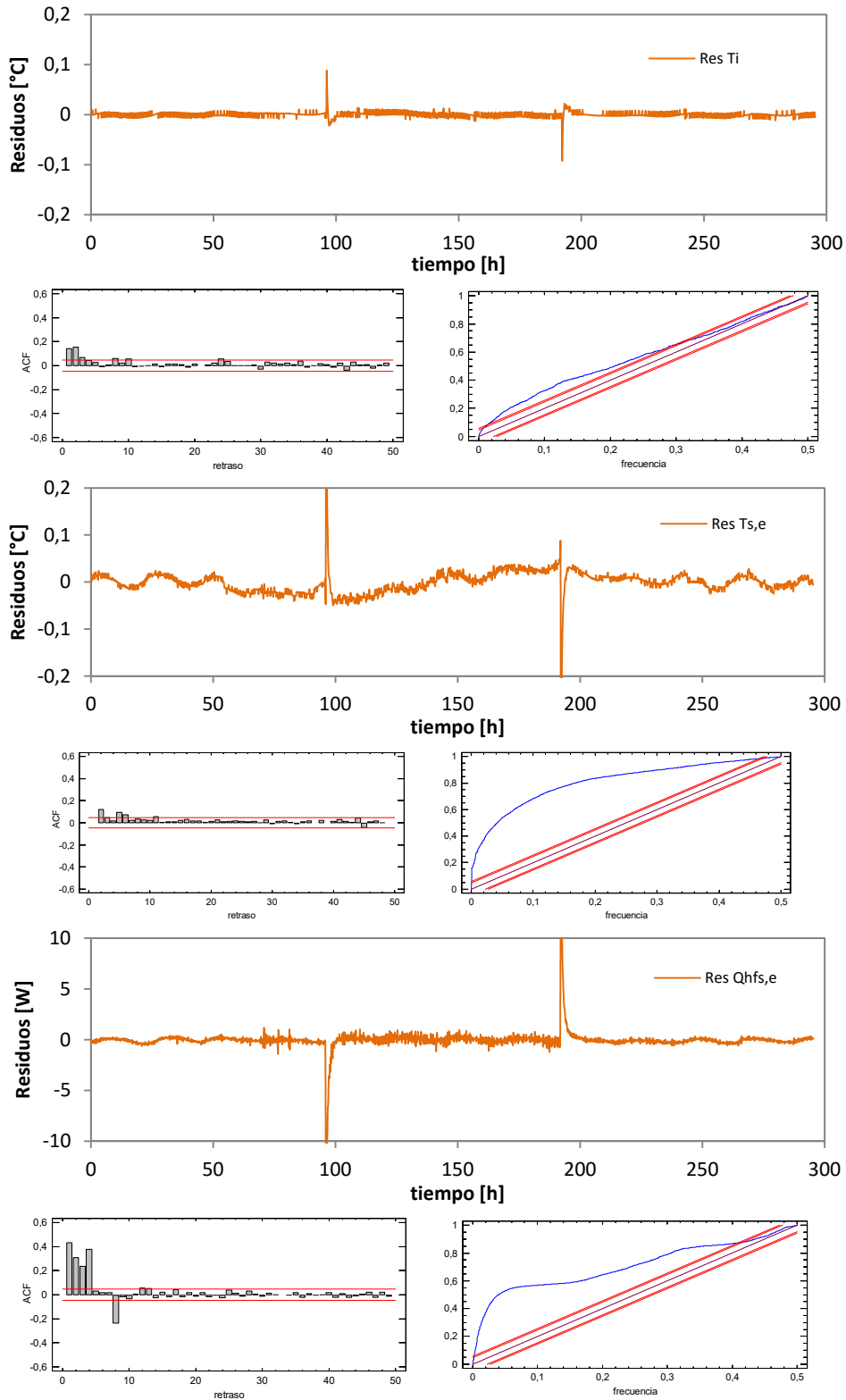


Figura A.49 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.07E+01	3.33E-02	620.7915	-0.0001	0
$T_{s,e}$	10	20	40	2.07E+01	9.17E-03	2255.0561	-0.0053	0
T_2	10	20	40	2.04E+01	2.03E-02	1006.5585	0.0005	0
H_4	10	500	1000	3.24E+02	3.44E+00	94.1898	0	0
C_i	1	100	500	2.92E+02	1.12E+00	80.6075	-0.0001	0.0099
$C_{s,e}$	10	1000	3000	6.75E+02	2.05E+00	54.8512	0	0.0003
H_5	1	10	1000	1.42E+02	3.31E+00	43.0395	0	0
C_2	1	5000	10000	8.32E+03	1.61E+01	34.3079	0	0
H_6	1	6	100	5.34E+00	1.23E-01	41.6774	0	0
A_1	0.5	1.2	1.5	9.83E-01	5.67E-02	20.0609	0	0.0012
A_2	0.5	1.2	1.5	1.31E+00	9.41E-03	89.3373	-0.0001	-0.0001

Tabla A.22 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 4

	T_i	$T_{s,e}$	T_2	H_4	C_i	$C_{s,e}$	H_5	C_2	H_6	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,e}$	0.33	1									
T_2	0.01	0.16	1								
H_4	-0.06	-0.07	0.00	1							
C_i	0.17	0.39	0.03	-0.25	1						
$C_{s,e}$	-0.20	-0.49	-0.02	0.31	-0.25	1					
H_5	-0.04	0.04	0.24	0.50	0.05	0.00	1				
C_2	-0.02	0.02	-0.03	0.39	-0.13	0.11	0.11	1			
H_6	0.00	0.03	0.01	0.46	-0.05	0.05	0.23	0.18	1		
A_1	0.04	0.03	0.00	-0.32	0.16	-0.22	-0.18	-0.39	-0.47	1	
A_2	-0.03	0.03	0.00	0.32	-0.13	0.14	0.18	0.40	0.48	-0.33	1

Tabla A.23 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 4

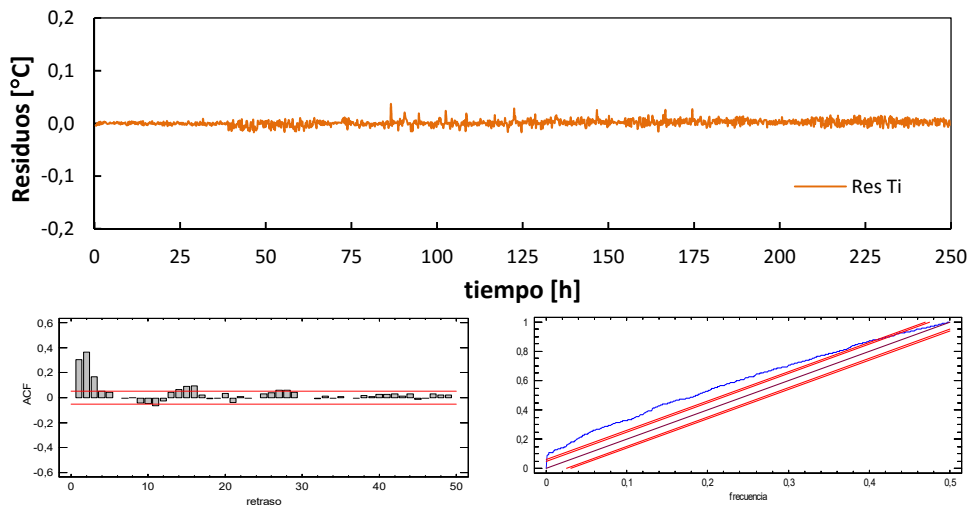


Figura A.50 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación PRBS

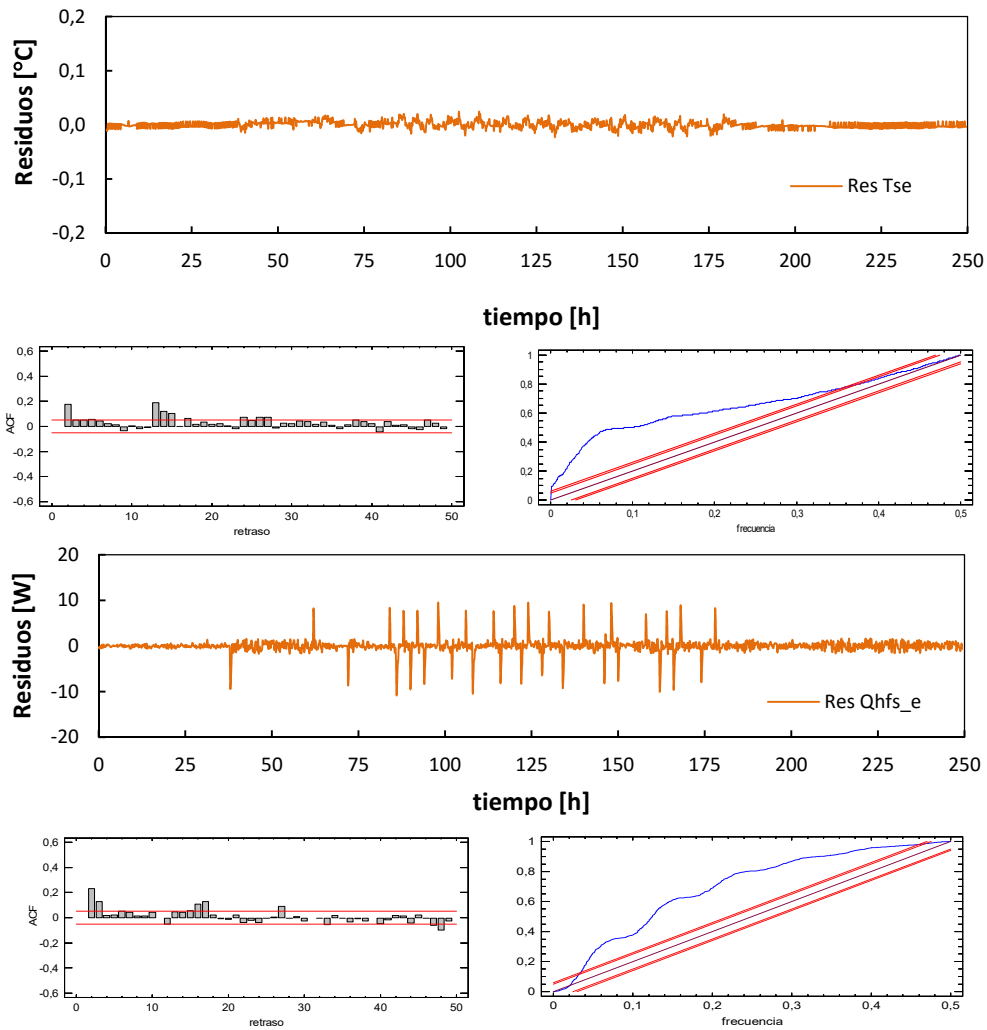


Figura A.51 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.42E+01	9.25E-03	2619.7522	-0.0001	0.0003
$T_{s,e}$	10	20	40	2.41E+01	8.71E-02	277.2572	0.0004	0.0003
T_2	10	20	40	2.38E+01	2.20E-02	1085.2363	0	0.0002
H_4	10	500	1000	2.35E+02	4.90E+00	47.8826	0	0
C_i	1	100	500	3.25E+02	2.08E+00	65.906	-0.0001	0.0007
$C_{s,e}$	10	1000	3000	7.43E+02	1.02E+01	12.114	0	0.0004
H_5	1	10	1000	1.03E+02	7.90E+00	13.078	0	0
C_2	1	5000	10000	7.59E+03	5.47E+01	7.8946	0	0
H_6	1	6	100	3.77E+00	9.15E-02	39.806	0	0
A_1	0.5	1.2	1.5	1.07E+00	4.44E-02	59.5866	0	0.0002
A_2	0.5	1.2	1.5	1.10E+00	6.90E-03	81.5508	0	-0.0071

Tabla A.24 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 4

	T_i	$T_{s,e}$	T_2	H_4	C_i	$C_{s,e}$	H_5	C_2	H_6	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,e}$	0.25	1									
T_2	-0.11	-0.44	1								
H_4	-0.21	-0.30	0.40	1							
C_i	-0.20	-0.27	0.36	0.20	1						
$C_{s,e}$	-0.22	-0.33	0.43	0.31	0.26	1					
H_5	-0.21	-0.30	0.20	0.29	0.24	0.30	1				
C_2	0.22	0.32	-0.45	-0.28	-0.27	-0.32	-0.30	1			
H_6	-0.11	-0.49	0.20	0.20	0.31	0.17	0.48	-0.43	1		
A_1	0.17	0.24	-0.32	-0.31	-0.42	-0.26	-0.24	0.22	-0.20	1	
A_2	-0.15	-0.21	0.29	0.30	0.32	0.23	0.22	-0.19	0.20	-0.31	1

Tabla A.24 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 4

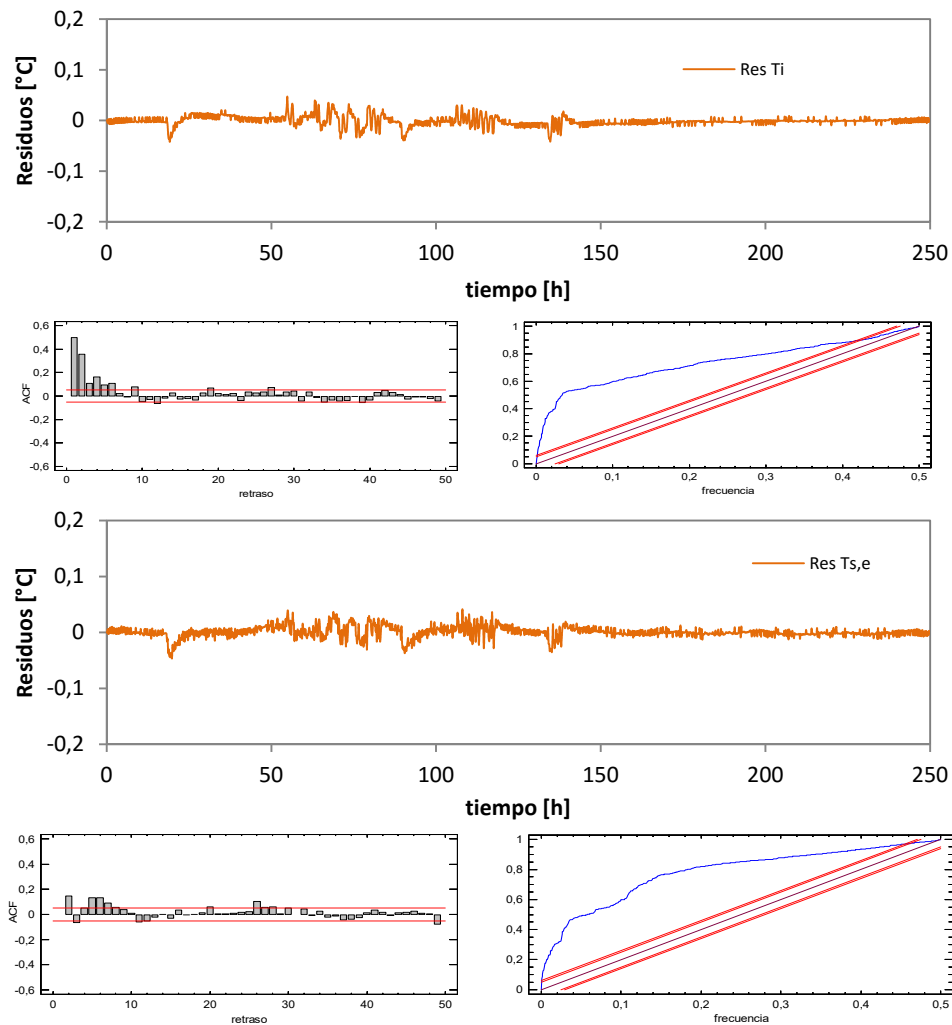


Figura A.52 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación ROLBS

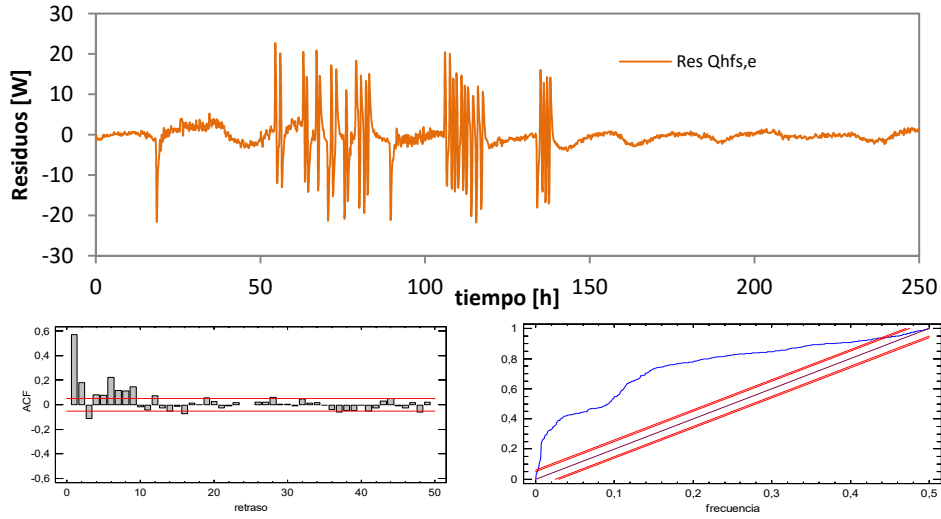


Figura A.53 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación ROLBS

A.3.1.5 Modelo 5

En el modelo 5 se analiza simultáneamente la rama de la envolvente y la rama correspondiente al muro de calibración. El modelo comienza a ser de relativa complejidad al tratarse de un modelo de orden cinco, pero su estudio se puede llevar a cabo gracias a el análisis realizado en los modelos 3 y 4, de forma que se disponen de resultados previos de los parámetros que se pueden emplear como valores iniciales y se puede ajustar el intervalo de estudio de los mismos. En este caso se pueden emplear las dos medidas de flujo de las *tiles*, $Q_{HFS,c}$ y $Q_{HFS,e}$, como funciones objetivo. En la ecuación [A.9] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.10] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \\ dT_{s,e} \\ dT_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(H_1 + H_4) & \frac{H_1}{C_i} & 0 & \frac{H_4}{C_i} & 0 \\ \frac{H_1}{C_{s,c}} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_{s,e}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & -(H_2 + H_3) & 0 & 0 \\ \frac{H_4}{C_{s,e}} & 0 & 0 & -(H_4 + H_5) & \frac{H_5}{C_{s,e}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_2} & -(H_5 + H_6) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,e} \\ T_2 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} 1 \\ C_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt \quad [A.9]$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,c}^m \\ T_{s,e}^m \\ Q_{HFS,e}^m \\ Q_{HFS,e}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{A_1} & \frac{-H_5}{A_1} \\ 0 & \frac{H_2}{A_2} & \frac{-H_2}{A_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,e} \\ T_2 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \end{bmatrix} + [e] \quad [A.10]$$

A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T _i	10	30	40	3.11E+01	2.94E-01	105.9416	0	0.0015
T _{s,c}	10	30	40	3.29E+01	1.78E-01	184.9312	0.0002	0.0026
T ₁	10	30	40	2.93E+01	3.24E-01	90.3456	-0.0001	0.0009
T _{s,e}	10	30	40	3.22E+01	9.95E-02	323.487	0.0001	0.002
T ₂	10	30	40	2.57E+01	3.58E-01	71.8298	0	0.0004
H ₁	10	100	200	8.24E+01	1.67E+00	42.9826	0.0003	0.0009
H ₄	100	300	600	3.96E+02	1.04E+00	381.0895	0.0002	0.0005
C _i	1	100	200	4.01E+01	4.19E-01	16.2283	0	0
C _{s,c}	10	500	1000	5.67E+01	3.65E-01	25.9085	0.0007	-0.0002
H ₂	0.5	3	200	2.12E+00	8.54E-02	33.423	0.0007	0
C ₁	10	500	1000	6.47E+02	5.60E+00	19.2733	0.0001	0
H ₃	0.5	3	200	2.21E+00	6.99E-02	31.6869	0	0
C _{s,e}	10	500	1500	1.07E+03	5.15E+00	34.6544	0	0.0001
H ₅	1	10	200	2.22E+01	2.02E-01	30.7472	0	0
C ₂	1000	5000	10000	6.51E+03	4.42E+01	24.5603	0	0
H ₆	1	10	200	8.23E+00	1.69E-01	22.1935	-0.0001	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	1.03E+00	5.39E-03	201.8217	-0.0006	-0.0001
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.18E+00	6.44E-03	209.4341	0	0.0084

Tabla A.25 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 5

	T_i	$T_{s,c}$	T_1	$T_{s,e}$	T_2	H_1	H_4	C_i	$C_{s,c}$	H_2	C_1	H_3	$C_{s,e}$	H_5	C_2	H_6	A_1	A_2
T_i	1																	
$T_{s,c}$	0.2	1																
T_1	-0.1	0.2	1															
$T_{s,e}$	0.4	0.4	-0.3	1														
T_2	0.0	-0.1	0.1	-0.1	1													
H_1	-0.4	-0.2	0.3	-0.2	0.1	1												
H_4	-0.3	-0.2	0.3	-0.3	0.1	0.2	1											
C_i	0.1	0.2	-0.4	0.3	-0.2	-0.3	-0.2	1										
$C_{s,c}$	-0.2	-0.2	0.4	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.3	1									
H_2	0.1	0.1	0.0	0.1	-0.1	-0.4	-0.4	0.4	-0.3	1								
C_1	0.2	0.2	-0.4	0.3	-0.2	-0.3	-0.3	0.3	-0.2	0.4	1							
H_3	0.2	0.2	-0.3	0.3	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	-0.1	0.3	1						
$C_{s,e}$	0.2	0.2	-0.4	0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0.3	-0.3	0.4	0.3	0.2	1					
H_5	-0.1	-0.1	0.2	-0.2	0.2	0.4	0.2	-0.2	0.4	-0.1	-0.5	-0.3	-0.4	1				
C_2	0.2	0.1	-0.2	0.2	-0.1	-0.2	-0.5	0.2	-0.5	0.2	0.4	0.4	0.4	-0.4	1			
H_6	-0.3	-0.1	0.3	-0.2	0.2	0.2	0.4	-0.2	0.2	-0.3	-0.2	-0.5	-0.2	0.3	-0.4	1		
A_1	0.3	0.5	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.3	0.3	-0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	-0.1	0.2	-0.2	1	
A_2	0.0	0.1	-0.3	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0.5	-0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	-0.2	0.2	-0.2	0.1	1

Tabla A.26 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PULSO* en el modelo 5

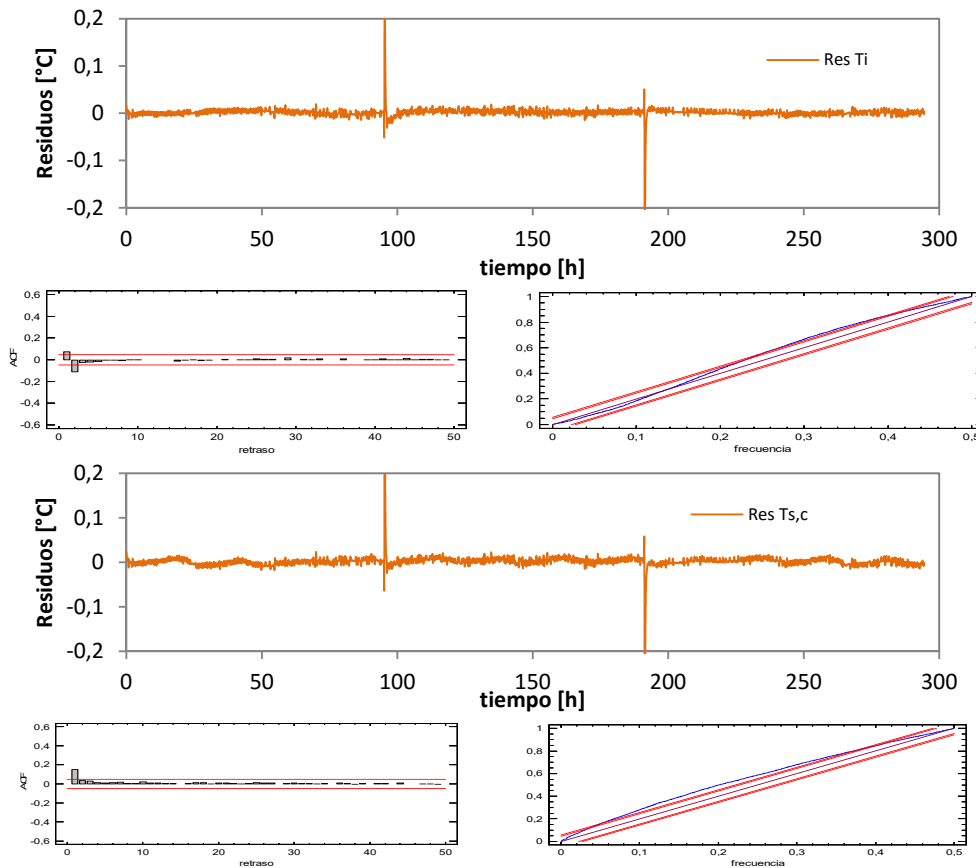


Figura A.54 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación *PULSO*

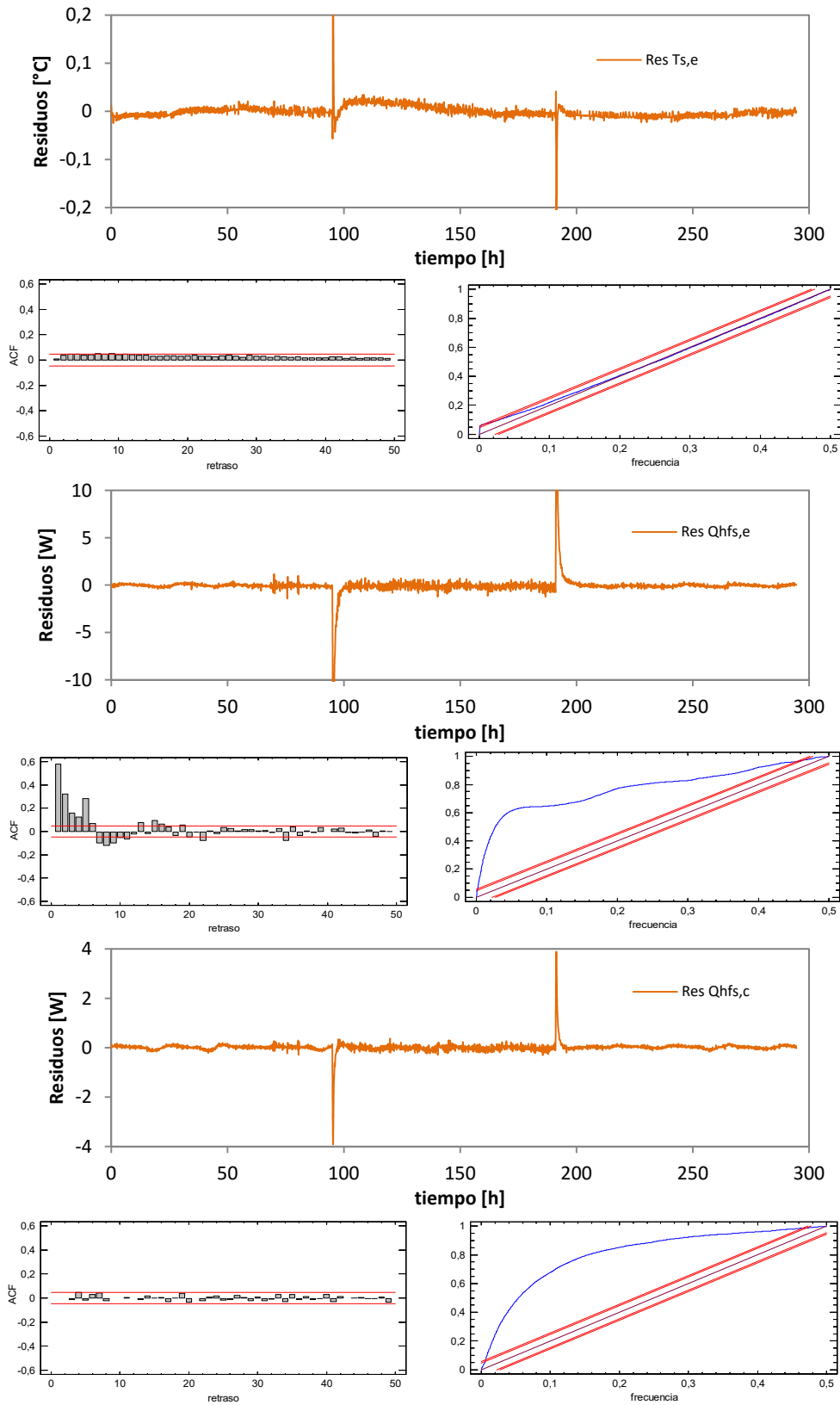


Figura A.55 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T _i	10	30	40	1.84E+01	1.94E-01	94.9206	-0.0001	-0.0002
T _{s,c}	10	30	40	1.65E+01	1.11E-01	148.2274	-0.0001	-0.0003
T ₁	10	30	40	1.68E+01	1.37E-01	123.2384	0	-0.0001
T _{s,e}	10	30	40	1.95E+01	7.51E-02	260.035	-0.0003	0
T ₂	10	30	40	1.97E+01	9.87E-02	199.4111	0.0000	0.0003
H ₁	10	100	200	8.04E+01	4.57E+00	314.7949	-0.0019	0.0002
H ₄	100	300	600	4.59E+02	1.49E+00	307.8105	0.0020	0.0014
C _i	1	100	200	1.67E+01	2.69E-01	41.7682	0.0001	0
C _{s,c}	10	500	1000	7.50E+02	1.57E+00	45.2	0	0
H ₂	0.5	3	200	9.89E+00	2.31E-01	42.7654	0.0001	0
C ₁	10	500	1000	4.88E+02	8.91E-01	91.2711	0	-0.0004
H ₃	0.5	3	200	1.16E+00	2.84E-03	212.4875	0	-0.0027
C _{s,e}	10	500	1500	1.25E+02	1.32E+00	94.9274	-0.0001	0.0004
H ₅	1	10	200	1.88E+02	2.10E+00	89.3385	-0.0002	0.0001
C ₂	1000	5000	10000	8.46E+03	2.55E+00	226.5439	0	-0.0049
H ₆	1	10	200	5.97E+00	1.59E-01	44.255	0.0001	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	9.95E-01	2.35E-03	422.557	-0.0011	0.0004
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.04E+00	1.22E-03	445.3582	-0.0001	-0.0155

Tabla A.27 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 5

	T _i	T _{s,c}	T ₁	T _{s,e}	T ₂	H ₁	H ₄	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,e}	H ₅	C ₂	H ₆	A ₁	A ₂
T _i	1																	
T _{s,c}	-0.1	1																
T ₁	0.0	0.0	1															
T _{s,e}	-0.1	-0.2	-0.1	1														
T ₂	0.0	-0.4	0.0	0.4	1													
H ₁	0.1	0.2	0.0	-0.1	-0.1	1												
H ₄	0.2	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.5	1											
C _i	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1										
C _{s,c}	0.0	-0.3	0.1	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1									
H ₂	0.1	0.0	0.2	-0.1	0.0	-0.5	0.0	0.0	0.1	1								
C ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1							
H ₃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1						
C _{s,e}	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1					
H ₅	0.0	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	0.5	0.2	0.0	0.1	-0.2	0.0	0.0	-0.1	1				
C ₂	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	-0.2	1			
H ₆	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.6	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.1	1		
A ₁	0.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	-0.3	-0.2	0.0	0.0	-0.3	0.4	-0.1	0.0	1	
A ₂	0.0	0.0	0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.2	0.1	-0.3	1

Tabla A.28 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 5

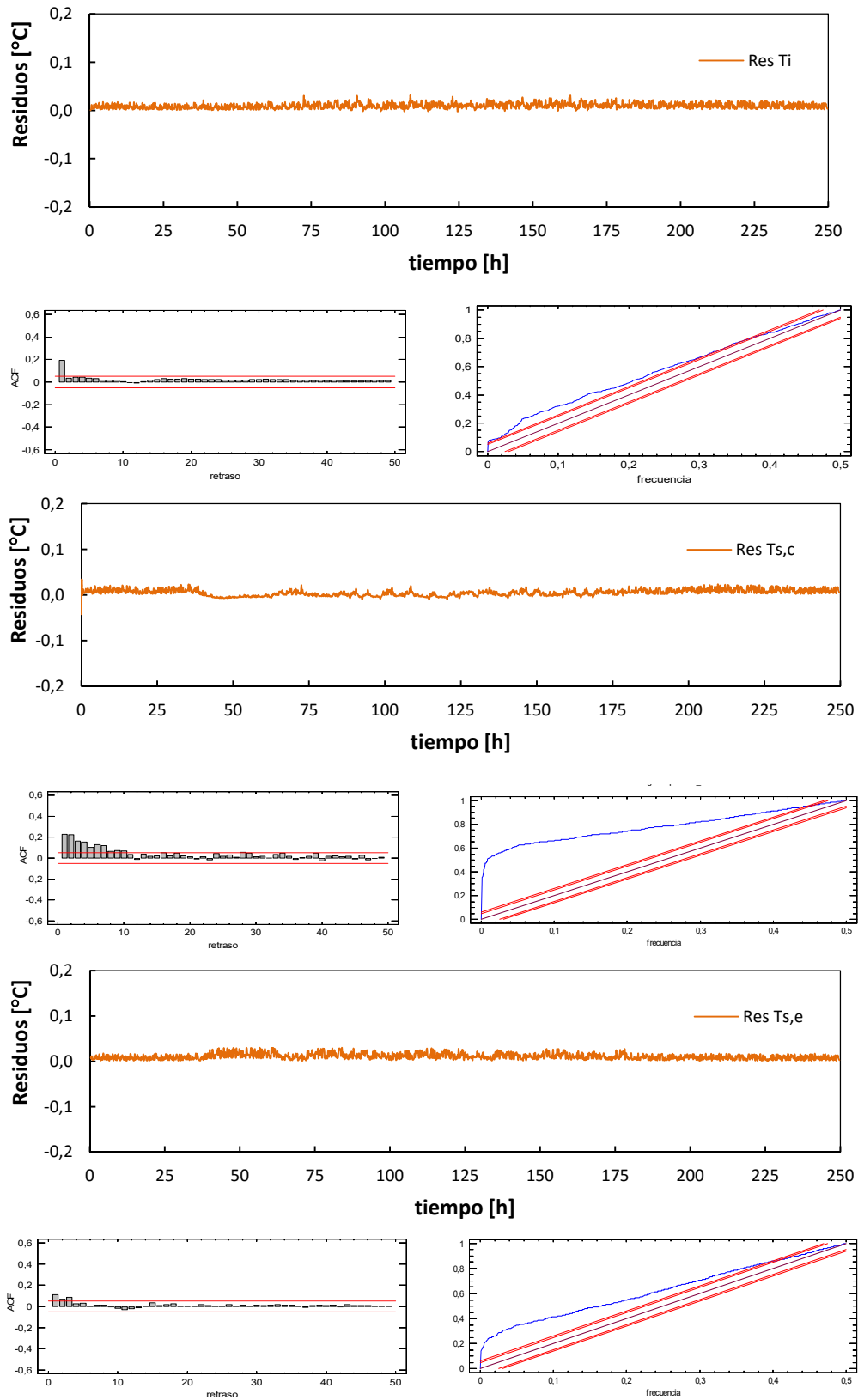


Figura A.56 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación PRBS

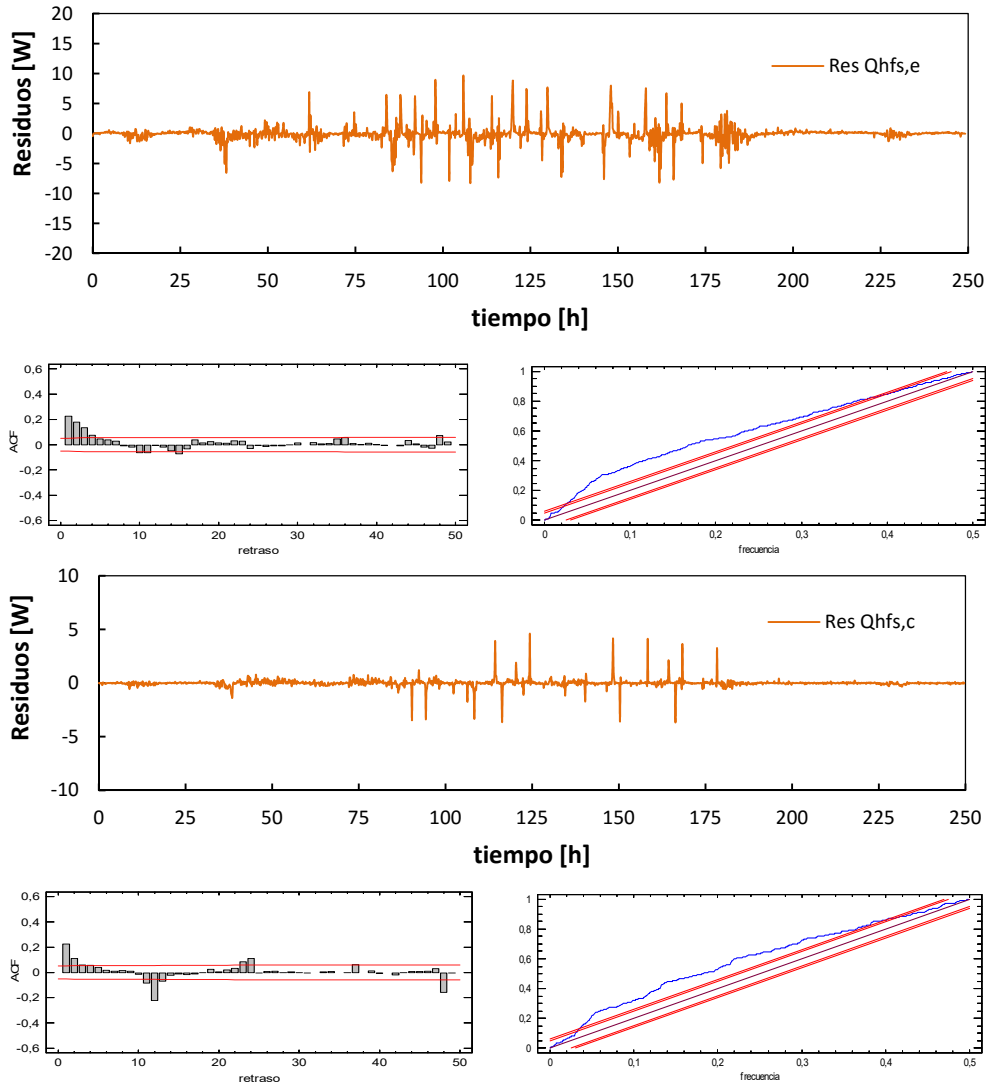


Figura A.57 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T _i	10	30	40	2.42E+01	1.73E-02	1404.6677	0.0009	0.0001
T _{s,c}	10	30	40	2.41E+01	1.25E-02	1935.326	-0.0004	0.0003
T ₁	10	30	40	2.35E+01	4.49E-02	523.9271	0.0002	0.0016
T _{s,e}	10	30	40	2.41E+01	4.11E-03	5877.9777	0.0031	0.0003
T ₂	10	30	40	2.38E+01	1.56E-02	1522.083	-0.0009	0.0017
H ₁	10	100	200	7.20E+01	2.70E+00	26.6202	-0.0005	0
H ₄	100	300	600	3.79E+02	2.76E+00	145.9761	-0.0007	0.0006
C _i	1	100	200	4.67E+01	1.54E+00	54.1869	0.0002	0.0031
C _{s,c}	10	500	1000	4.12E+02	2.10E+00	22.7695	-0.0001	0
H ₂	0.5	3	200	1.94E+01	1.21E+00	15.955	-0.0001	0
C ₁	10	500	1000	5.58E+02	7.82E+00	13.981	0	-0.0001
H ₃	0.5	3	200	9.97E-01	1.08E-02	92.0843	-0.0125	8.3009
C _{s,e}	10	500	1500	9.60E+02	1.76E+00	64.5638	0.0003	0.0003
H ₅	1	10	200	1.54E+02	3.45E+00	44.7612	0.0003	0.0001
C ₂	1000	5000	10000	9.78E+03	1.61E+01	42.589	0.0001	-0.001
H ₆	1	10	200	5.55E+00	9.91E-02	57.3397	0	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	9.43E-01	5.85E-03	149.3222	-0.0024	0.0051
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.16E+00	3.10E-02	27.1839	0.0001	0.0031

Tabla A.29 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 5

	T _i	T _{s,c}	T ₁	T _{s,e}	T ₂	H ₁	H ₄	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,e}	H ₅	C ₂	H ₆	A ₁	A ₂
T _i	1																	
T _{s,c}	0.1	1																
T ₁	0.0	0.1	1															
T _{s,e}	0.4	0.1	0.0	1														
T ₂	0.0	0.0	0.0	0.3	1													
H ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1												
H ₄	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3	1											
C _i	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	1										
C _{s,c}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	-0.3	-0.1	1									
H ₂	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.2	-0.2	0.0	0.5	1								
C ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	-0.4	0.0	0.4	0.3	1							
H ₃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	-0.1	0.0	0.2	0.1	0.2	1						
C _{s,e}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4	0.5	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	1					
H ₅	0.0	0.0	0.1	0.0	0.4	-0.2	0.2	0.1	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.1	1				
C ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.3	-0.1	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.0	1			
H ₆	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4	0.4	0.0	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.2	0.1	0.2	1		
A ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.3	0.0	-0.3	-0.2	-0.5	-0.2	0.4	0.2	0.3	0.4	1	
A ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	-0.3	-0.1	0.3	0.2	0.5	0.2	-0.4	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3	1

Tabla A.30 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 5

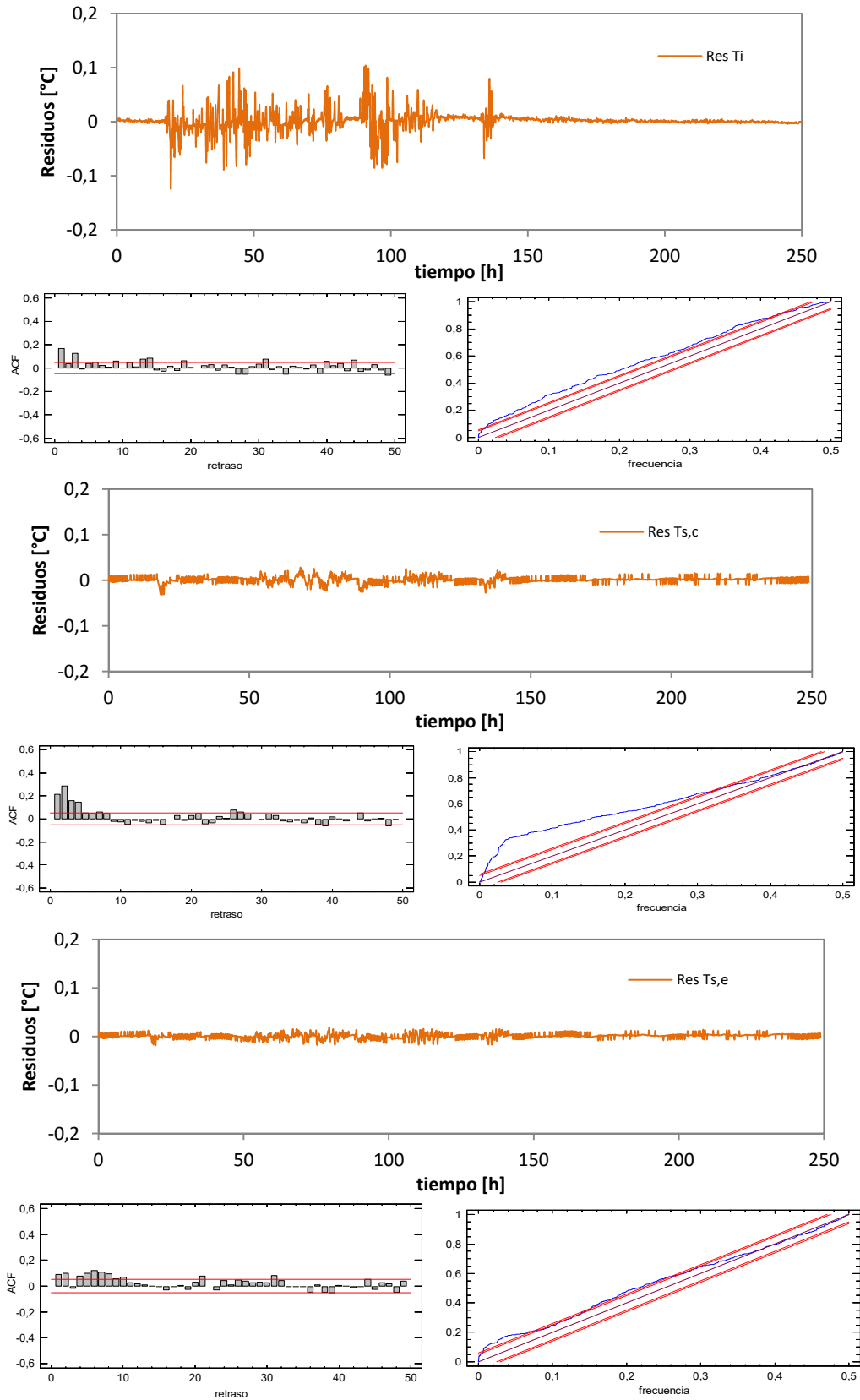


Figura A.58 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación ROLBS

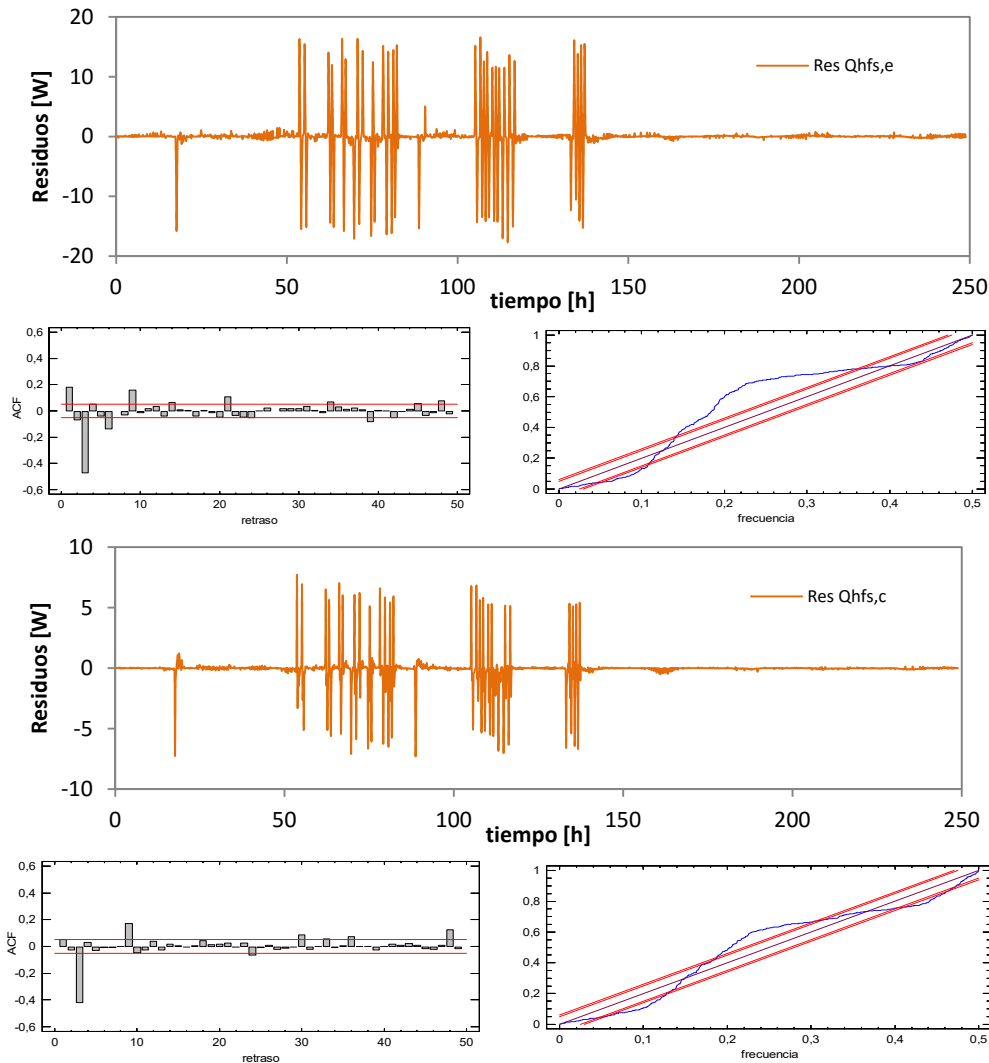


Figura A.59 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación ROLBS

A.3.1.6 Modelo 6

En el modelo 6 se define unas de las configuraciones más completa de la celda. En este caso se suma al modelo 5 el flujo intercambiado por la cara norte. En principio se espera que mejore el ajuste debido a que dicha cara presenta unas condiciones muy diferentes al resto de la envolvente. Por ejemplo, la temperatura a la que está sometida es la de la sala de servicio y no la temperatura exterior. Además dispone de la particularidad de la puerta de acceso, que aún configurada de forma que se que mantenga la geometría constructiva del resto de la envolvente de la sala de ensayos, en cuanto al espesor de aislamiento, la configuración real implica diferente comportamiento. Por otro lado, el flujo de calor neto intercambiado por dicha cara norte es residual en relación al flujo que intercambia el resto de la envolvente, por lo que puede darse el caso de que el aumento de la complejidad del modelo no compense con la mejora en los resultados de ajuste al patrón de ruido blanco respecto al modelo anterior. En la ecuación [A.11] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.12] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \\ dT_{s,l} \\ dT_2 \\ dT_{s,n} \\ dT_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(H_1 + H_4 + H_7) & H_1 & 0 & H_4 & 0 & H_7 & 0 \\ C_i & C_i & 0 & C_i & 0 & C_i & 0 \\ H_1 & -(H_1 + H_2) & H_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{s,c} & C_{s,c} & C_{s,c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_2 & -(H_2 + H_3) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_1 & C_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_4 & 0 & 0 & -(H_2 + H_3) & H_5 & 0 & 0 \\ C_{s,l} & 0 & 0 & C_{s,l} & C_{s,l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_5 & -(H_5 + H_6) & 0 & 0 \\ C_2 & 0 & 0 & C_2 & C_2 & 0 & 0 \\ H_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(H_7 + H_8) & H_8 \\ C_{s,n} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{s,n} & C_{s,n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_8 & -(H_8 + H_9) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,l} \\ T_2 \\ T_{s,n} \\ T_3 \end{bmatrix} dt$$

[A.11]

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_6}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_9}{C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \\ T_{a,ss} \end{bmatrix} dt + [c]dt$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,c}^m \\ T_{s,e}^m \\ T_{s,n}^m \\ Q_{HFS,l}^m \\ Q_{HFS,c}^m \\ Q_{HFS,n}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{A_1} & -\frac{H_5}{A_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{A_2} & -\frac{H_2}{A_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_8}{A_3} & -\frac{H_8}{A_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,l} \\ T_2 \\ T_{s,n} \\ T_3 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \\ T_{a,ss} \end{bmatrix} + [e]$$

[A.12]

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	10	100	200	8.61E+01	4.89E-01	1759.5962	0.0067	0.0001
H ₄	100	300	600	2.97E+02	2.43E+00	122.2374	0.0012	0.0001
H ₇	5	50	200	4.96E+01	3.60E-01	137.7578	0.0083	0
C _i	1	100	200	3.67E+01	1.14E-01	53.9298	-0.0048	0
C _{s,c}	10	500	1000	4.70E+02	3.11E-01	251.7839	0.0184	0.0016
H ₂	0.5	3	200	1.61E+00	9.48E-02	35.9708	0	0
C ₁	10	500	1500	1.05E+03	6.54E-01	267.7491	0.0125	0.0001
H ₃	0.5	3	200	2.07E+00	3.85E-02	59.4094	0	0
C _{s,l}	100	500	1000	5.13E+02	2.93E-01	221.159	0.0039	0.0001
H ₅	1	10	200	5.15E+00	4.18E-02	52.3771	-0.0009	-0.0002
C ₂	1000	5000	10000	1.46E+03	8.32E+00	174.8678	-0.0028	0.001
H ₆	1	10	500	2.70E+02	1.65E-02	42.6569	-0.0001	0
C _{s,n}	1	500	1000	2.70E+02	3.25E-01	202.4922	0.0039	0.0001
H ₈	0.1	100	500	2.72E-01	4.57E-03	59.5017	0.0001	-0.0001
C ₃	1	100	500	3.29E+02	2.48E+00	132.6191	-0.0019	0.0006
H ₉	0.1	1	100	1.41E+00	3.92E-02	35.8472	0	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	1.04E+00	3.41E-03	333.141	0.0036	0.0011
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.18E+00	9.37E-04	1575.3271	-0.0003	0.3846
A ₃	0.8	1.2	1.5	1.06E+00	1.92E-03	294.8912	0	-0.0063

Tabla A.31 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 6

	H ₁	H ₄	H ₇	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,l}	H ₅	C ₂	H ₆	C _{s,n}	H ₈	C ₃	H ₉	A ₁	A ₂	A ₃	
H ₁	1																			
H ₄	-0.3	1																		
H ₇	-0.2	0.2	1																	
C _i	0.3	-0.2	-0.3	1																
C _{s,c}	0.3	-0.3	-0.3	0.3	1															
H ₂	0.2	-0.2	-0.3	0.3	0.2	1														
C ₁	-0.2	0.3	0.3	-0.2	-0.4	-0.2	1													
H ₃	-0.3	0.4	0.2	-0.2	-0.4	-0.2	0.4	1												
C _{s,l}	-0.3	0.3	0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.2	0.2	1											
H ₅	0.2	-0.3	-0.3	0.3	0.3	0.3	-0.2	-0.5	-0.3	1										
C ₂	-0.2	0.3	0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.2	0.2	0.3	-0.3	1									
H ₆	0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.2	0.1	-0.1	1								
C _{s,n}	0.3	-0.3	-0.3	0.3	0.3	0.3	-0.2	-0.2	-0.3	0.3	-0.3	0.1	1							
H ₈	0.0	-0.5	-0.5	0.3	0.4	0.5	-0.2	-0.4	-0.2	0.2	-0.2	-0.1	0.3	1						
C ₃	-0.2	0.2	0.5	-0.4	-0.2	-0.2	0.0	0.2	0.2	-0.2	0.4	0.0	-0.2	-0.1	1					
H ₉	-0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.1	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	1				
A ₁	-0.2	0.3	0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0.3	0.3	0.2	-0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.4	0.2	0.1	1			
A ₂	0.5	-0.2	-0.4	0.5	0.2	0.2	-0.3	-0.1	-0.5	0.2	-0.4	0.0	0.2	0.2	-0.4	-0.1	-0.2	1		
A ₃	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.2	0.0	0.0	-0.2	-0.2	1	

Tabla A.32 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 6

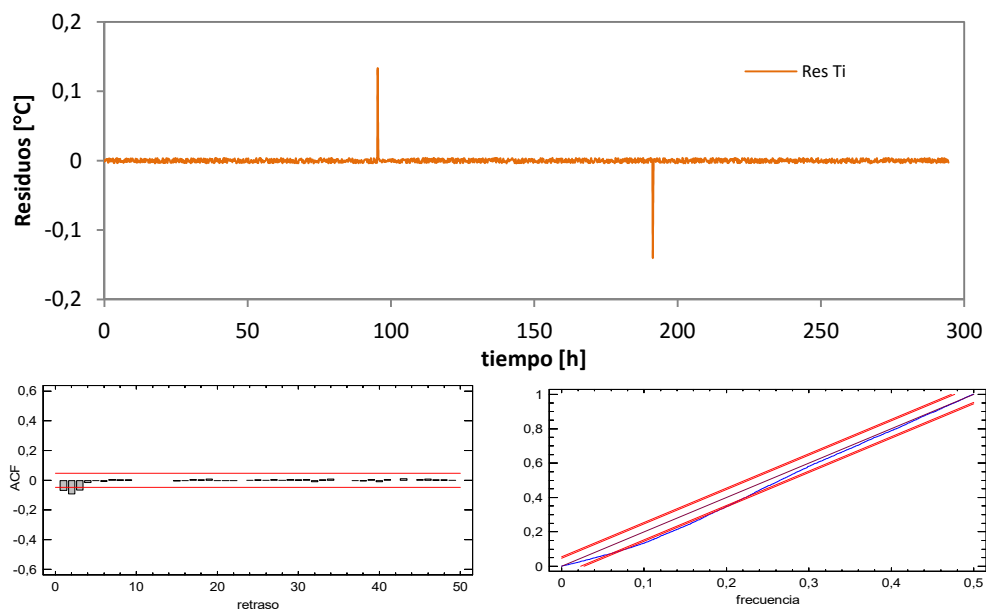


Figura A.60 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PULSO

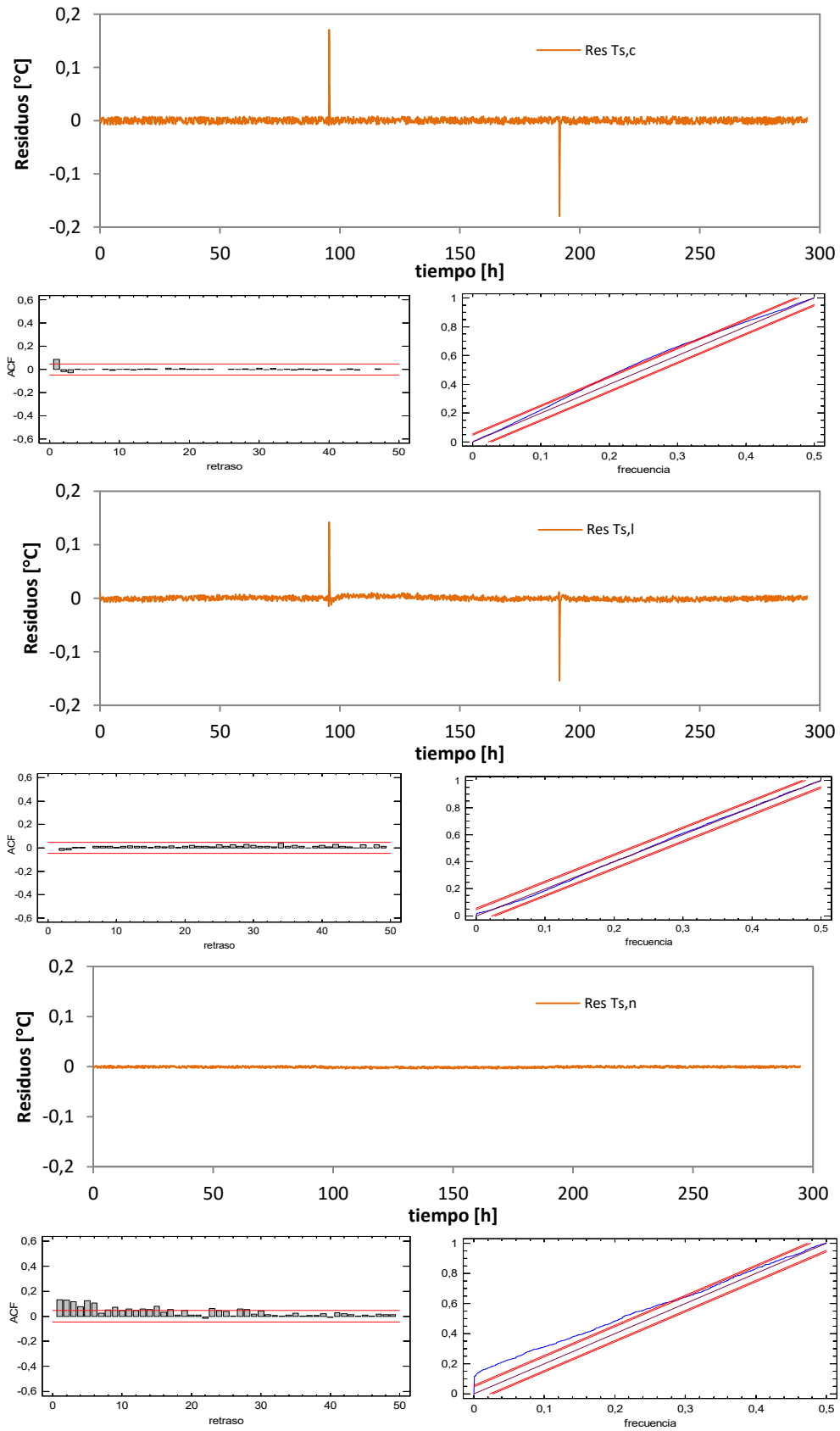


Figura A.61 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PULSO

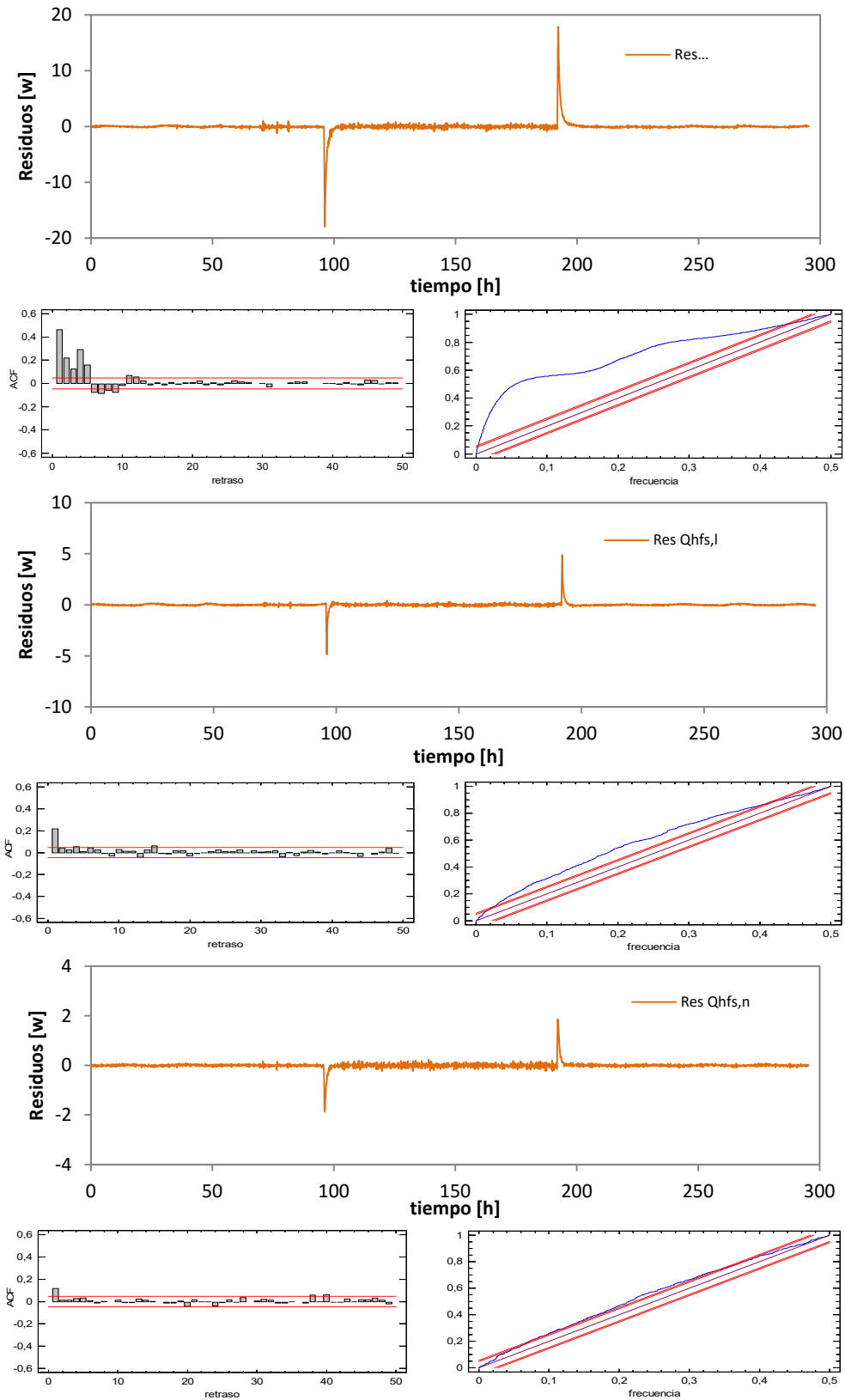


Figura A.62 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	10	100	200	8.28E+01	1.48E+00	55.8786	0	0
H ₄	100	300	600	3.32E+02	2.44E+00	135.9801	0.0001	0.0001
H ₇	5	50	200	4.27E+01	1.50E+00	28.4487	-0.0001	0
C _i	1	100	200	1.57E+02	1.91E+00	31.4328	-0.0003	0.0004
C _{s,c}	10	500	1000	2.82E+02	1.56E+00	30.1184	0	0
H ₂	0.5	3	200	2.10E+01	7.98E-01	26.2918	0	0
C ₁	10	500	1500	6.63E+02	4.80E+00	23.054	0	0
H ₃	0.5	3	200	1.10E+00	4.22E-02	25.9374	0	-0.0002
C _{s,l}	100	500	1000	6.43E+02	1.92E+00	53.8984	-0.001	0.0002
H ₅	1	10	200	1.10E+02	1.89E+00	58.4402	0	0
C ₂	1000	5000	10000	8.20E+03	1.18E+01	45.8888	0	0
H ₆	1	10	500	4.51E+00	9.08E-02	49.6415	0	0
C _{s,n}	1	500	1000	2.97E+02	7.05E-01	25.0352	0	0
H ₈	0.1	100	500	1.44E+01	5.45E-01	26.3583	0	0
C ₃	1	100	500	5.04E+02	2.03E+00	24.7778	0	0
H ₉	0.1	1	100	7.26E-01	2.64E-02	27.5439	0	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	1.08E+00	6.25E-03	146.485	-0.0001	0.0113
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.14E+00	1.50E-02	66.415	0.0001	7.3191
A ₃	0.8	1.2	1.5	1.04E+00	3.46E-02	28.7434	0	2.2057

Tabla A.33 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 6

	H ₁	H ₄	H ₇	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,l}	H ₅	C ₂	H ₆	C _{s,n}	H ₈	C ₃	H ₉	A ₁	A ₂	A ₃	
H ₁	1																			
H ₄	-0.2	1																		
H ₇	0.0	-0.2	1																	
C _i	0.1	-0.3	-0.2	1																
C _{s,c}	0.2	-0.4	0.0	0.0	1															
H ₂	0.3	-0.2	0.0	0.1	0.1	1														
C ₁	0.3	-0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	1													
H ₃	0.3	-0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	1												
C _{s,l}	-0.3	0.2	-0.1	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	1											
H ₅	-0.2	0.3	-0.3	0.1	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	0.1	1										
C ₂	-0.2	0.3	-0.2	0.0	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.1	-0.1	1									
H ₆	-0.2	0.3	-0.2	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	1								
C _{s,n}	0.0	-0.4	0.3	-0.4	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.2	-0.3	-0.2	-0.2	1							
H ₈	0.0	-0.2	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.3	1						
C ₃	0.0	-0.5	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.3	0.3	1					
H ₉	0.0	-0.2	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2	0.3	0.3	0.3	1				
A ₁	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	1			
A ₂	0.3	-0.2	0.0	0.1	0.5	0.4	0.4	0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.2	1		
A ₃	0.0	-0.2	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	-0.2	0.0	0.0	1

Tabla A.34 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 6

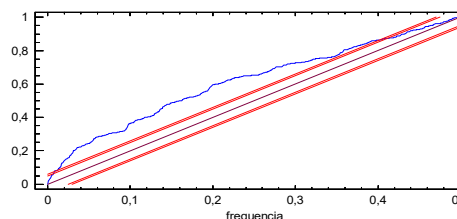
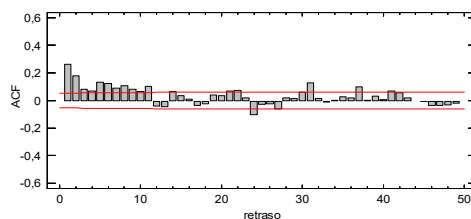
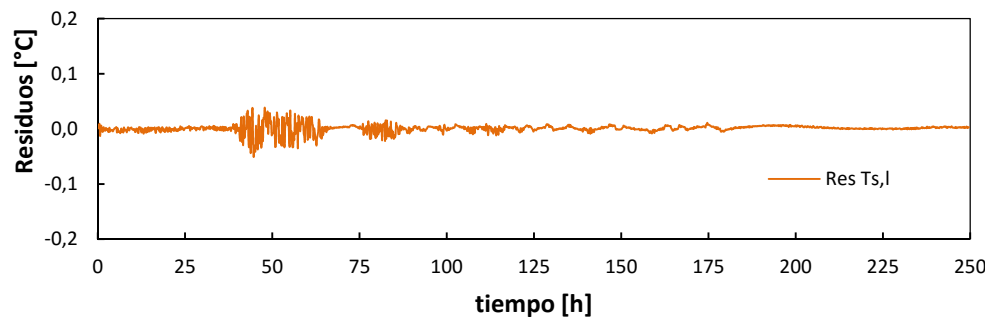
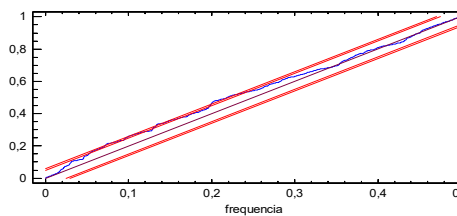
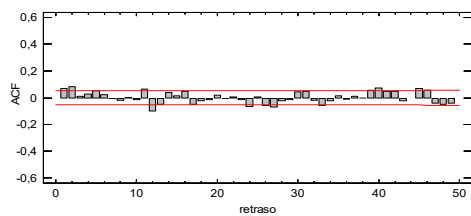
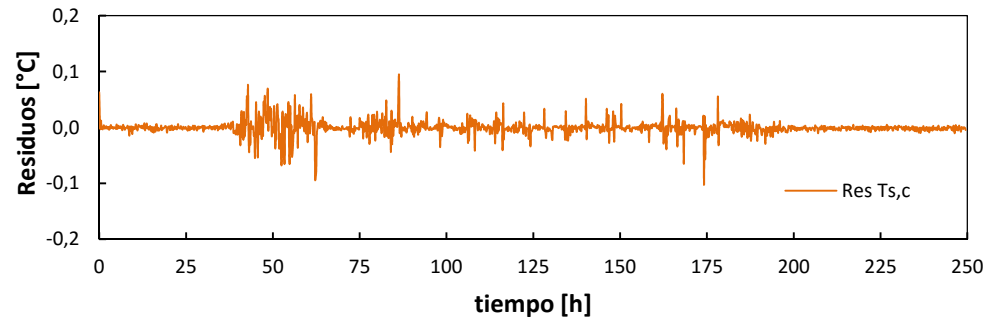
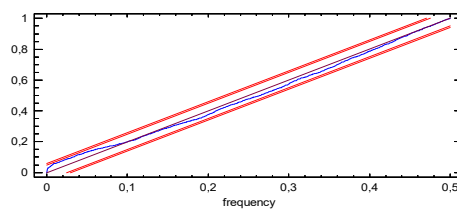
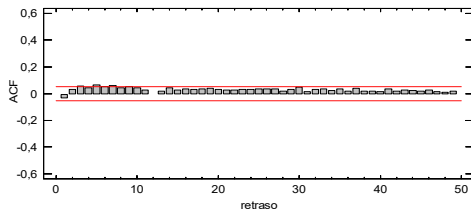
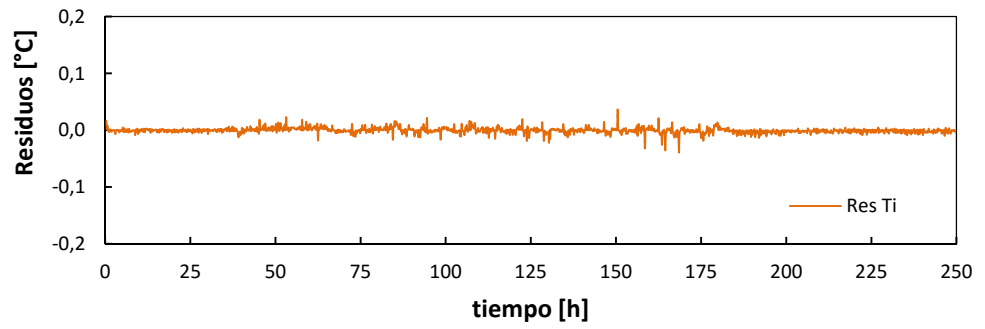


Figura A.63 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

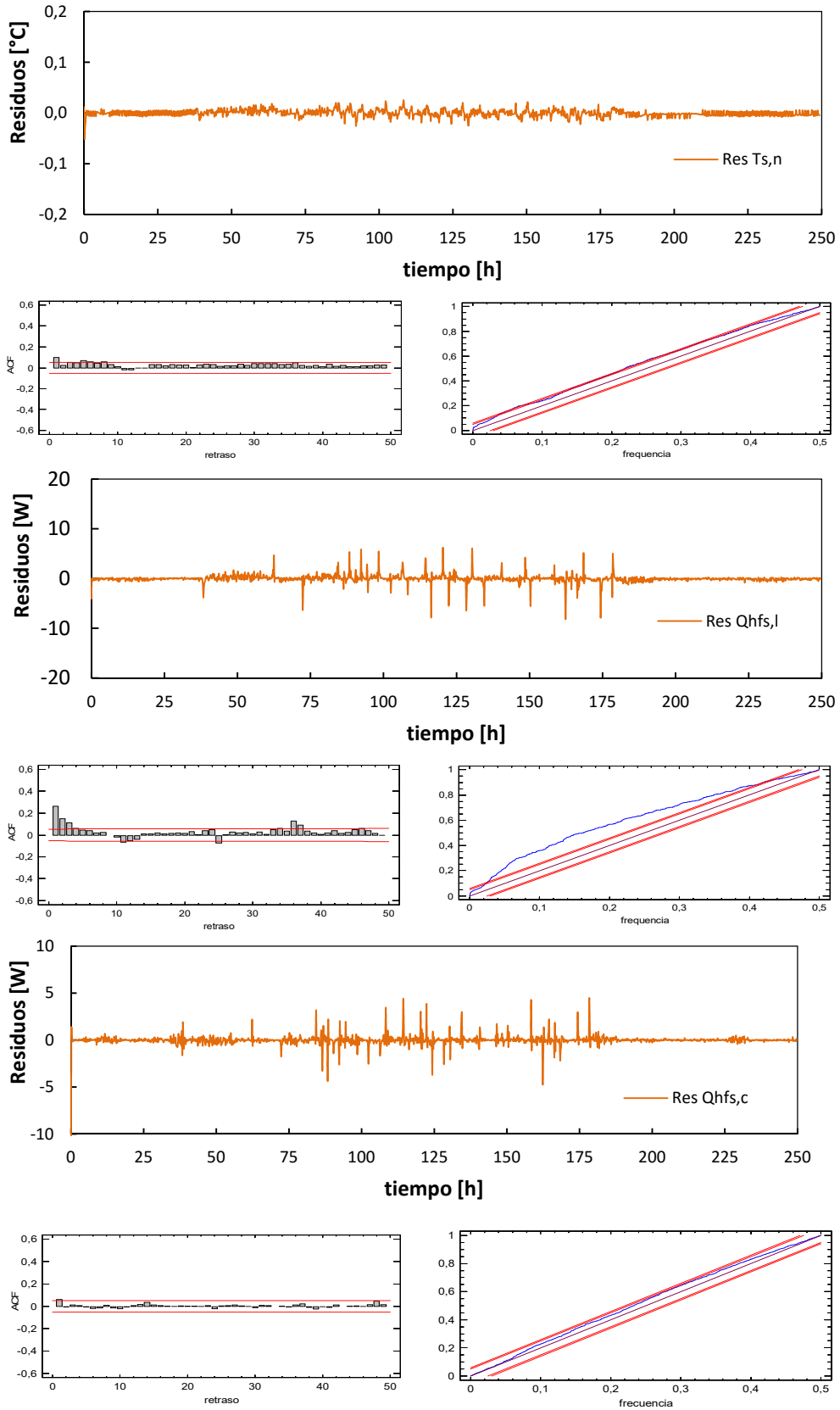


Figura A.64 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

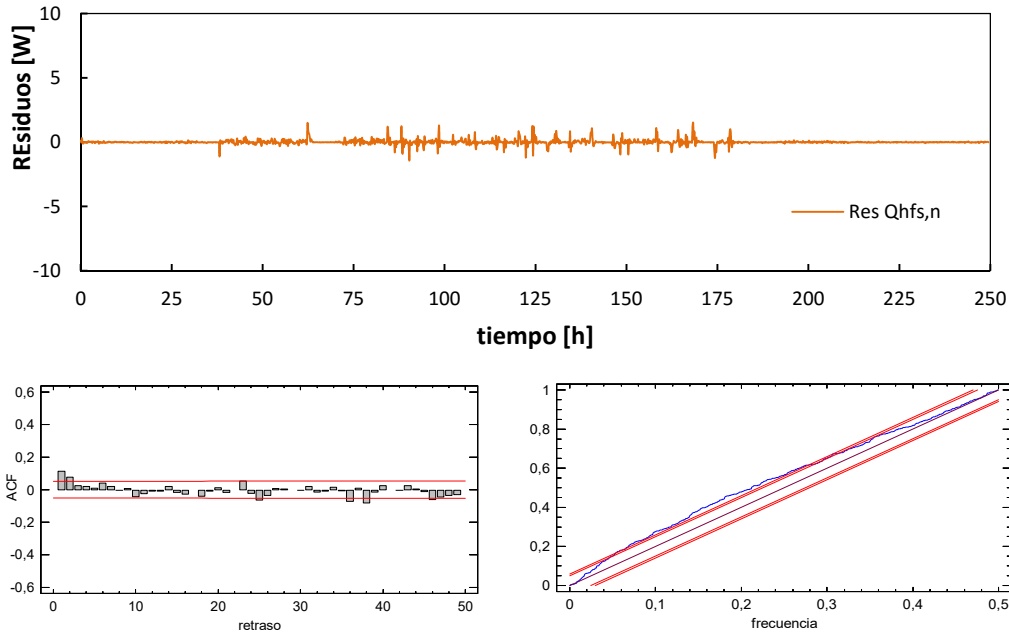


Figura A.65 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	10	100	200	6.22E+01	2.71E+00	1554.0032	-0.0030	0.0034
H ₄	100	300	600	2.61E+02	5.60E-01	453.1604	-0.0003	0
H ₇	5	50	200	5.00E+01	6.74E-02	741.9822	-0.0019	0
C _i	1	100	200	4.33E+01	6.82E-02	384.058	0.0003	0
C _{s,c}	10	500	1000	3.22E+02	1.31E-01	2212.9337	-0.0077	0.0776
H ₂	0.5	3	200	1.71E+01	8.26E-02	207.2765	0.0002	0
C ₁	10	500	1500	4.33E+02	3.23E-01	396.9656	-0.0009	0
H ₃	0.5	3	200	9.82E-01	1.13E-02	105.1034	0	-0.0001
C _{s,l}	100	500	1000	5.25E+02	2.89E-02	3839.7743	-0.0030	0.0003
H ₅	1	10	200	1.50E+02	4.91E-01	305.6297	-0.0009	0.0001
C ₂	1000	5000	10000	8.33E+03	1.19E+00	516.2195	-0.0013	0.0001
H ₆	1	10	500	4.78E+00	7.16E-02	66.7905	0	0
C _{s,n}	1	500	1000	3.03E+02	1.06E-01	429.3755	-0.0004	0
H ₈	0.1	100	500	1.74E+01	1.38E-01	125.5773	-0.0002	0
C ₃	1	100	500	6.15E+02	1.58E+00	38.9058	-0.0005	0
H ₉	0.1	1	100	1.27E+00	1.33E-02	62.2658	0.0001	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	9.38E-01	3.18E-03	294.9435	-0.0005	-0.0002
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.10E+00	8.12E-03	118.6874	0.0001	0.0001
A ₃	0.8	1.2	1.5	1.08E+00	3.96E-03	273.5802	0.0001	0.0025

Tabla A.35 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 6

	H ₁	H ₄	H ₇	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,l}	H ₅	C ₂	H ₆	C _{s,n}	H ₈	C ₃	H ₉	A ₁	A ₂	A ₃	
H ₁	1																			
H ₄	0.2	1																		
H ₇	-0.4	-0.5	1																	
C _i	-0.4	-0.4	0.2	1																
C _{s,c}	0.4	0.3	0.1	-0.3	1															
H ₂	-0.1	-0.2	0.2	0.1	0.2	1														
C ₁	0.2	0.2	-0.4	-0.3	0.3	-0.4	1													
H ₃	-0.2	0.3	-0.2	0.1	-0.3	-0.3	0.0	1												
C _{s,l}	0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.3	0.4	0.2	1											
H ₅	0.2	0.2	-0.3	-0.3	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.4	1										
C ₂	-0.5	-0.2	0.4	0.2	-0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	1									
H ₆	0.2	0.4	-0.2	-0.2	0.2	0.0	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	1								
C _{s,n}	-0.2	-0.2	0.4	0.2	-0.2	0.2	-0.2	0.0	-0.5	-0.3	0.2	-0.2	1							
H ₈	-0.2	-0.1	0.2	-0.4	0.2	0.3	0.2	-0.2	-0.2	0.3	-0.2	0.3	0.0	1						
C ₃	0.2	0.2	-0.2	-0.3	0.3	-0.2	0.3	-0.1	0.3	0.3	-0.3	0.2	-0.3	0.4	1					
H ₉	0.0	0.2	-0.4	-0.2	0.3	-0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	-0.4	0.2	-0.2	-0.1	0.3	1				
A ₁	-0.1	0.2	-0.3	0.2	-0.2	-0.4	-0.4	0.3	0.4	-0.4	0.2	-0.4	0.3	-0.2	-0.2	0.0	1			
A ₂	-0.4	-0.4	-0.1	0.2	-0.2	0.0	-0.2	0.3	-0.1	-0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.4	-0.2	-0.1	0.4	1		
A ₃	0.0	0.0	0.1	-0.2	0.2	0.1	0.2	-0.1	-0.1	0.2	-0.1	0.1	-0.2	0.2	0.2	0.1	-0.1	-0.1	1	

Tabla A.36 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 6

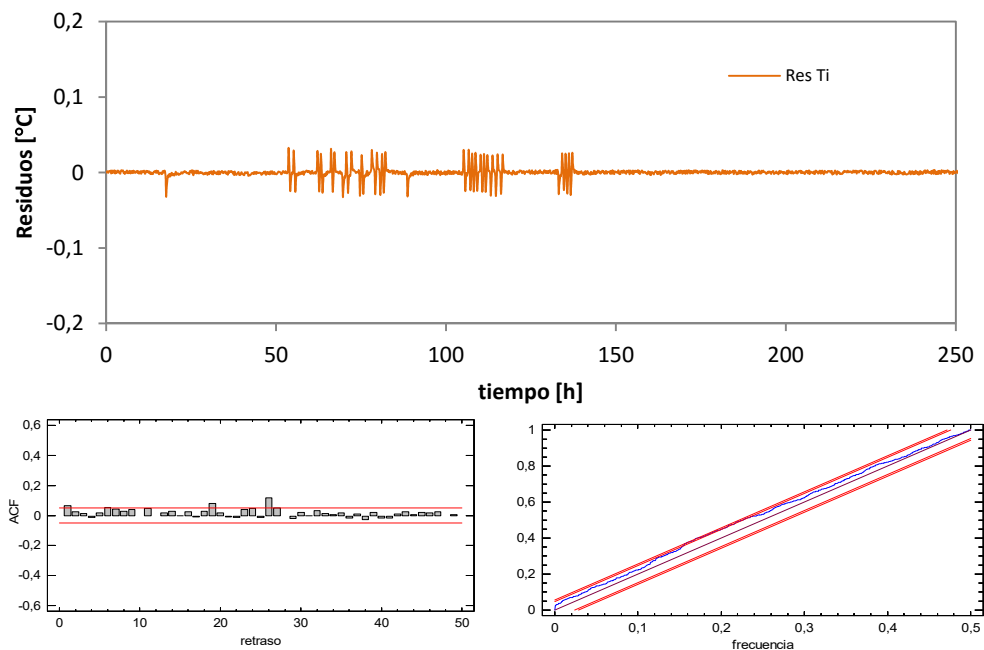


Figura A.66 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación ROLBS

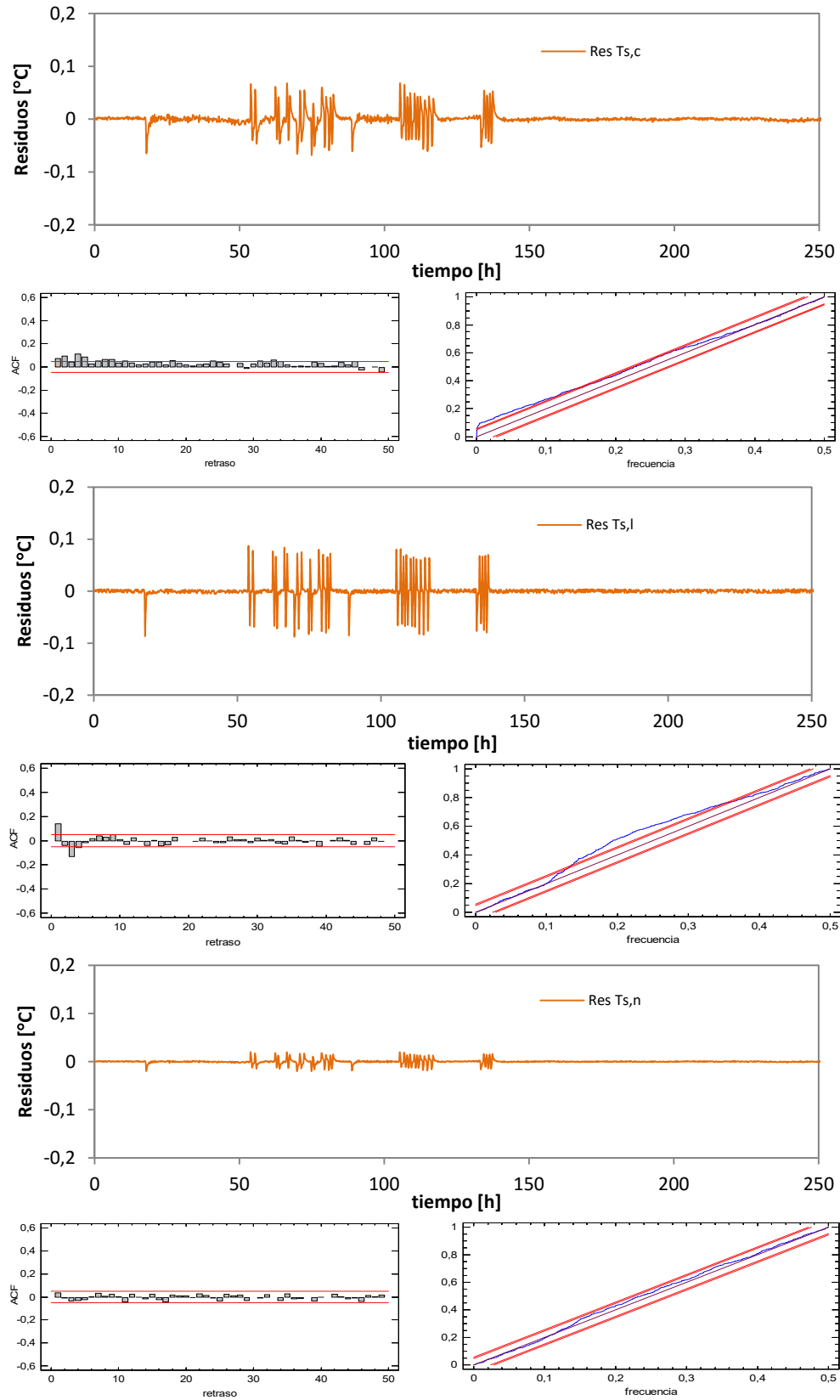


Figura A.67 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación ROLBS

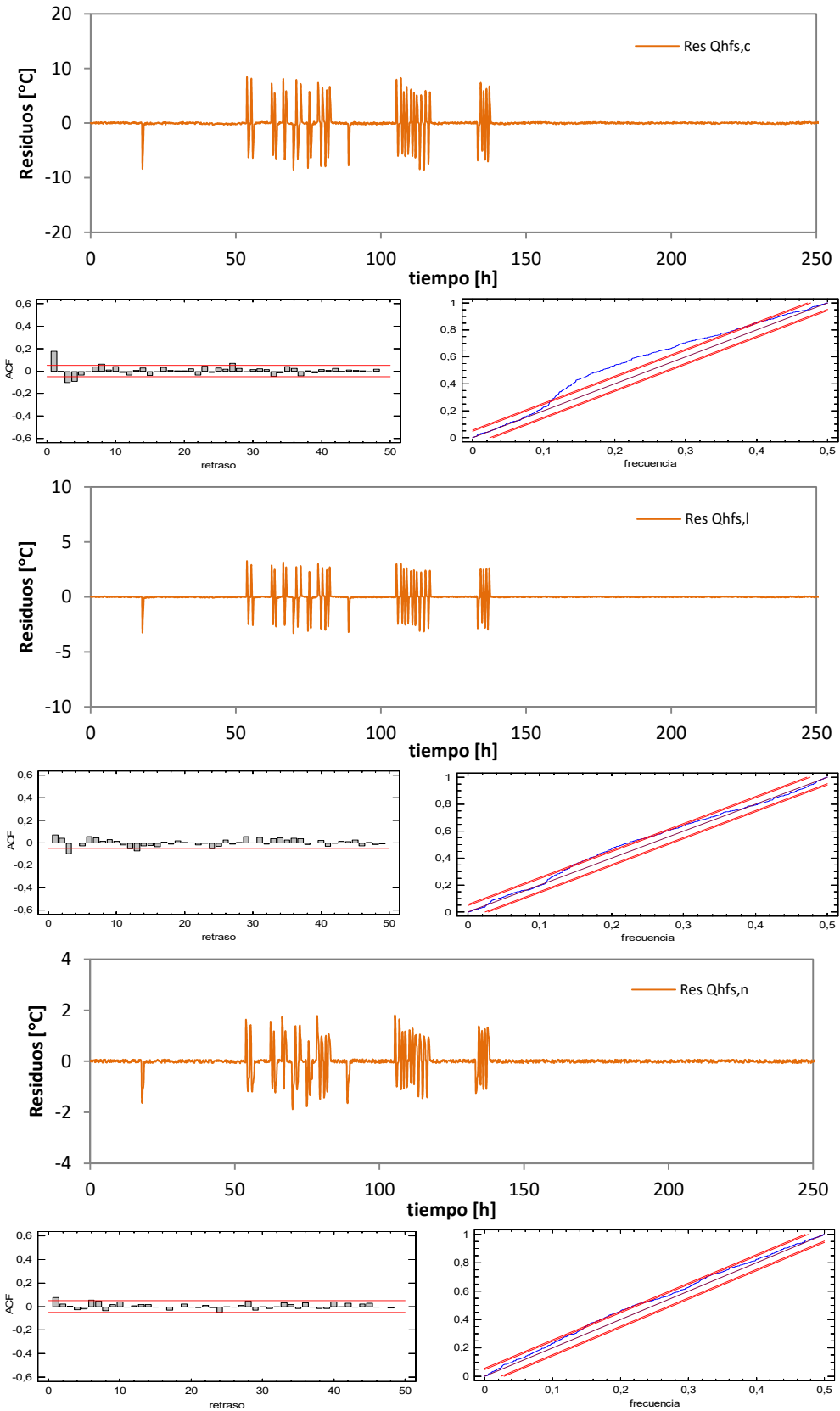


Figura A.67 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación ROLBS

A.3.2 Modelo del muro de calibración

A.3.1.1 Flujo unidimensional

Resultados de los modelos de identificación de parámetros para la determinación del modelo óptimo unidimensional del muro de calibración para la rutina ROLBS. Con el análisis de una rutina es suficiente para el proceso de optimización. En la Figura A.68 se muestra el modelo genérico que se emplea en el estudio, donde el subíndice N corresponde al orden del modelo.

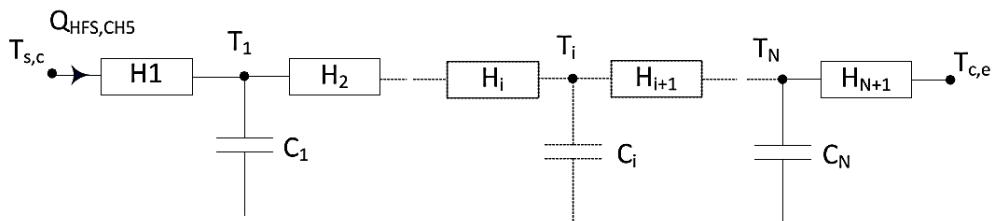


Figura A.68– Modelo unidimensional para la zona central del muro de calibración

A continuación se recogen los resultados del proceso de identificación de parámetros para cada orden de modelo. Como datos de alimentación al modelo se emplea los registrados durante la rutina *ROLBS*, ya que se trata de la rutina que exige mayor orden de modelo debido a su alta frecuencia. De forma que si se optimiza el modelo para dicha rutina se optimiza también para el resto de rutinas de ensayo.

Modelo 1º orden

En las ecuaciones [A.13] y [A.14] se recoge la definición del modelo y la función objetivo, que en este caso se reduce únicamente al flujo central medido por el grupo CH5 de *tiles*. Posteriormente se muestran los resultados junto con el análisis de residuos.

$$[dT_1] = \left[\frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} \right] [T_1] dt + \left[\frac{H_1}{C_1} \quad \frac{H_2}{C_1} \right] \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma_1] dW \quad [A.13]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [H_1][T_1(t)] + [H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [s_{CH5}] de(t) \quad [A.14]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	0.2	10	50	7.71E+00	7.21E-01	107.02	0	0
H_2	0.2	10	50	2.18E-03	2.03E-01	10.621	0	-0.0172
C_1	10	200	500	1.30E+02	1.99E+00	31.098	0	0.0008

Tabla A.37 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 1

	H_1	H_2	C_1
H_1	1		
H_2	-0.098	1	
C_1	0.133	0.040	1

Tabla A.38 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 1

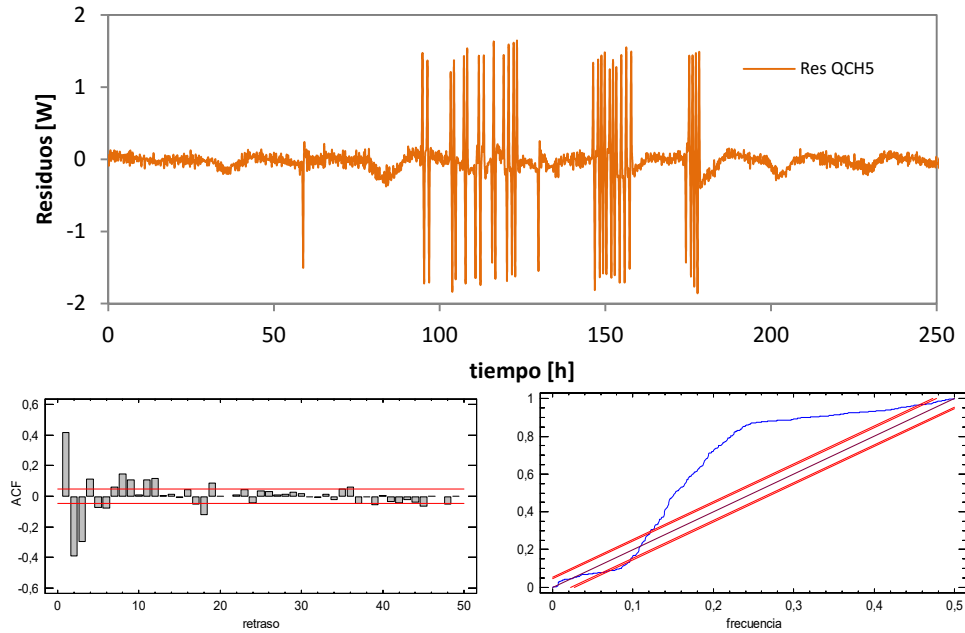


Figura A.69– Análisis del modelo unidimensional de orden 1 para el flujo central del muro de calibración

El proceso de identificación se obtiene sin introducir el error de las variables de entrada, $T_{s,c}$ y $T_{c,e}$ y el error de la función objetivo, $Q_{HFS,CH5}$. Como la herramienta empleada es el CTSM, en este caso, la forma de anular el componente de error de la función entrada es imponiendo un valor de $s_{CH5} = 0$. De esta forma se obtiene la incertidumbre del proceso de identificación de parámetros para la transmitancia total y para la capacidad térmica. En el caso de transmitancia H , ecuación [A.15], se obtiene de aplicar la expresión correspondiente a la propagación de incertidumbres de los valores de H_1 y H_2 del modelo, ecuación [A.16], junto con los errores del proceso de ajuste que se pueden tomar del resultado de la desviación estándar indicada en la Tabla A.37.

$$H = \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \quad [A.15]$$

$$u_{H_mod} = \left[\left(\frac{\partial H}{\partial H_1} \right)^2 u^2(H_1) + \left(\frac{\partial H}{\partial H_2} \right)^2 u^2(H_2) \right]^{1/2} \quad [A.16]$$

En el caso de la capacidad térmica, la incertidumbre se obtiene directamente del resultado del modelo. Y para modelos de orden mayor, se obtiene directamente como media geométrica de las incertidumbres de cada capacidad térmica individual. Los

resultados finales que se obtienen se muestran en la Tabla A.39, hay que tener en cuenta que los valores de capacidad térmica en el modelo están en unidades de [W/10min/K] y las unidades de trabajo son en [MJ/K].

	valor	u [%]
H [W/K]	0.212	1.2
C [MJ/K]	0.078	1.5

Tabla A.39 – Resultados finales transmitancia y capacidad térmica junto con la incertidumbre del modelo de identificación de parámetros

Para determinar la incertidumbre final del resultado es necesario tener en cuenta el error de medida de las propias variables de entrada y de la función objetivo. Para ello, se introduce el error de cada variable en el modelo y se calcula el efecto en cada uno de los parámetros y en el resultado final, es decir, se determina un dU y dC asociado a cada error de medida de cada variable mencionada que participa del modelo. Los valores de dU y dC se obtiene como diferencia entre la transmitancia resultado respecto a la transmitancia base obtenida sin error en las variables medidas. Aplicando este proceso se obtienen los resultados de la Tabla A.40.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
$T_{s,c}$	0.2	K	0.002	0.001
$T_{c,e}$	0.5	K	0.004	0.001
Q_{CH5}	0.1	W	0.006	0.004

Tabla A.40 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación

De igual forma, si se considera la incertidumbre de propagación de los errores de calibración de las variables de medida a los resultados del modelo como la raíz de la suma de cuadrados se obtienen los resultados indicados en la Tabla A.41.

	u [%]
H [W/K]	3.2
C [MJ/K]	1.9

Tabla A.41 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación

Por último, se toma como incertidumbre total la combinación de la incertidumbre del modelo y la incertidumbre propagada del error de las variables de medida se obtiene el resultado final mostrado en la Tabla A.42.

	u [%]
H [W/K]	3.4
C [MJ/K]	2.4

Tabla A.42 – Incertidumbre final de la transmitancia y la capacidad térmica de la zona con flujo unidimensional del muro de calibración

Este mismo proceso se aplica el resto de modelos de orden creciente con el que se analiza el comportamiento de la zona unidimensional del muro de calibración, que se muestra a continuación.

Modelo 2º orden

En las ecuaciones [A.17] y [A.18] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 2, y en la Tabla A.43 los resultados del modelo y en la Tabla A.44 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dW \quad [\text{A.17}]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \end{bmatrix} + [H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [S_{CH5}]de(t) \quad [\text{A.18}]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	50	100	2.36E+00	7.62E-02	15.783	0	0
H ₂	0.2	50	100	1.12E+00	3.74E-02	15.3	0	0
C ₁	10	100	500	2.77E+01	5.22E-01	15.365	0	0
C ₂	10	100	500	1.04E+02	1.90E+00	15.866	0	0.0001
H ₃	0.2	50	100	3.08E-01	1.00E-02	15.703	0	0

Tabla A.43 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 2

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	0.184	1			
C ₁	0.195	0.185	1		
C ₂	0.195	0.188	0.186	1	
H ₃	0.195	0.178	0.187	0.196	1

Tabla A.44 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 2

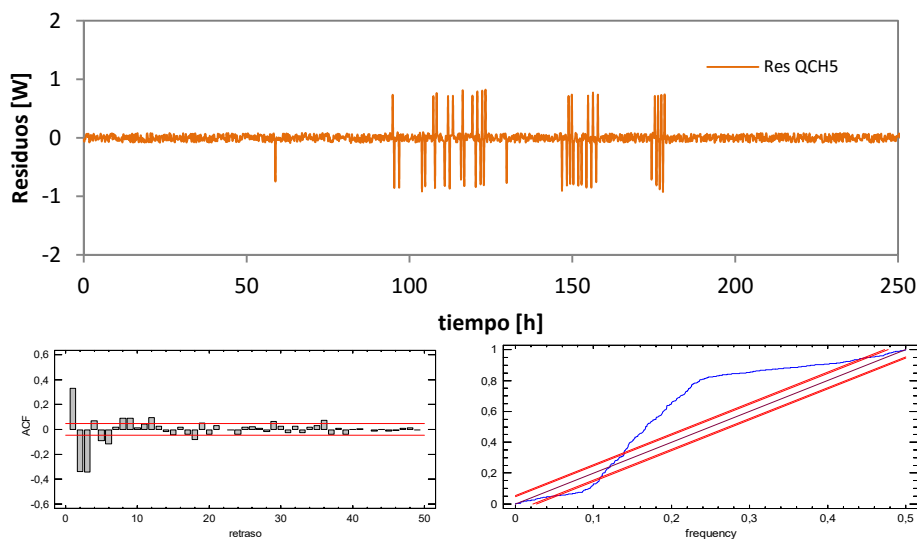


Figura A.70– Análisis del modelo unidimensional de orden 2 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.45 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
$T_{s,c}$	0.2	K	0.003	0.001
$T_{c,e}$	0.5	K	0.005	0.001
Q_{CH5}	0.1	W	0.011	0.002

Tabla A.45 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 2

Modelo 3º orden

En las ecuaciones [A.19] y [A.20] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 3, y en la Tabla A.46 los resultados del modelo y en la Tabla A.47 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{H_4}{C_3} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dW \quad [\text{A.19}]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \end{bmatrix} + [H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [s_{CH5}]de(t) \quad [\text{A.20}]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	0.2	50	100	7.82E-01	1.39E-02	21.439	0	0
H_2	0.2	50	100	2.93E-01	5.78E-03	19.263	0	-0.0001
C_1	10	100	500	1.30E+01	5.28E-02	19.312	0	0
C_2	10	100	500	1.51E+01	3.00E-01	3.933	0	0
H_3	0.2	50	100	8.26E+00	8.78E-01	3.582	0	0
C_3	10	100	500	9.78E+01	9.11E-01	8.39	0	0.0014
H_4	0.2	50	100	5.06E+01	1.00E+00	19.267	0	0.0701

Tabla A.46 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 3

	H_1	H_2	C_1	C_2	H_3	C_3	H_4
H_1	1						
H_2	0.306	1					
C_1	0.301	0.292	1				
C_2	-0.031	-0.174	-0.055	1			
H_3	-0.006	-0.176	-0.013	0.303	1		
C_3	-0.102	-0.126	-0.136	0.013	0.217	1	
H_4	-0.083	-0.106	-0.074	0.171	0.129	0.401	1

Tabla A.47 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 3

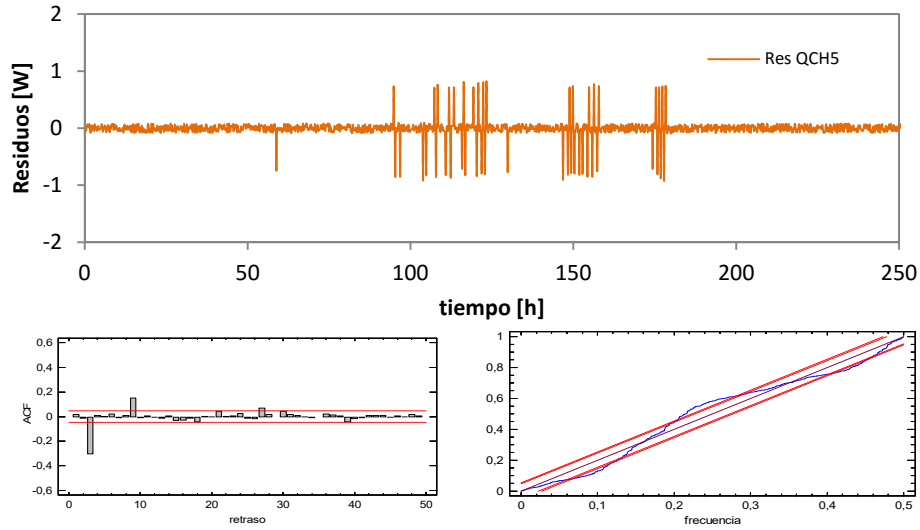


Figura A.71– Análisis del modelo unidimensional de orden 3 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.48 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
$T_{s,c}$	0.2	K	0.001	0.001
$T_{c,e}$	0.5	K	0.002	0.001
Q_{CH5}	0.1	W	0.004	0.001

Tabla A.48 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 3

Modelo 4º orden

En las ecuaciones [A.21] y [A.22] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 4, y en la Tabla A.49 los resultados del modelo y en la Tabla A.50 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dW \quad [A.21]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \end{bmatrix} + [H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [s_{CH5}]de(t) \quad [A.22]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	50	200	7.66E-01	7.80E-03	252.05	0	-0.0001
H ₂	0.2	50	200	2.93E-01	3.44E-03	218.35	0	-0.002
C ₁	1	100	500	1.48E+01	4.06E-02	222.73	0	0
C ₂	1	100	500	9.70E+00	1.57E-01	37.67	0	0
H ₃	0.2	50	200	7.09E+00	4.82E-01	37.72	0	0
C ₃	1	100	500	2.45E+01	5.54E-01	26.9	0	0.0001
H ₄	0.2	50	200	2.54E+01	3.13E+00	20.85	0	0
C ₄	1	100	500	7.80E+01	3.32E-01	143.08	0	0.0395
H ₅	0.2	50	200	5.63E+01	9.84E-01	146.81	0	0.07

Tabla A.49 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 4

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅
H ₁	1								
H ₂	0.294	1							
C ₁	0.288	0.274	1						
C ₂	-0.120	-0.262	-0.098	1					
H ₃	0.158	-0.064	0.155	0.210	1				
C ₃	-0.318	-0.346	-0.275	0.392	-0.007	1			
H ₄	-0.328	-0.368	-0.265	0.197	0.001	0.293	1		
C ₄	0.123	0.089	0.097	-0.094	0.104	-0.231	-0.173	1	
H ₅	-0.367	-0.326	-0.289	0.343	-0.124	0.201	0.195	-0.078	1

Tabla A.50 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 4

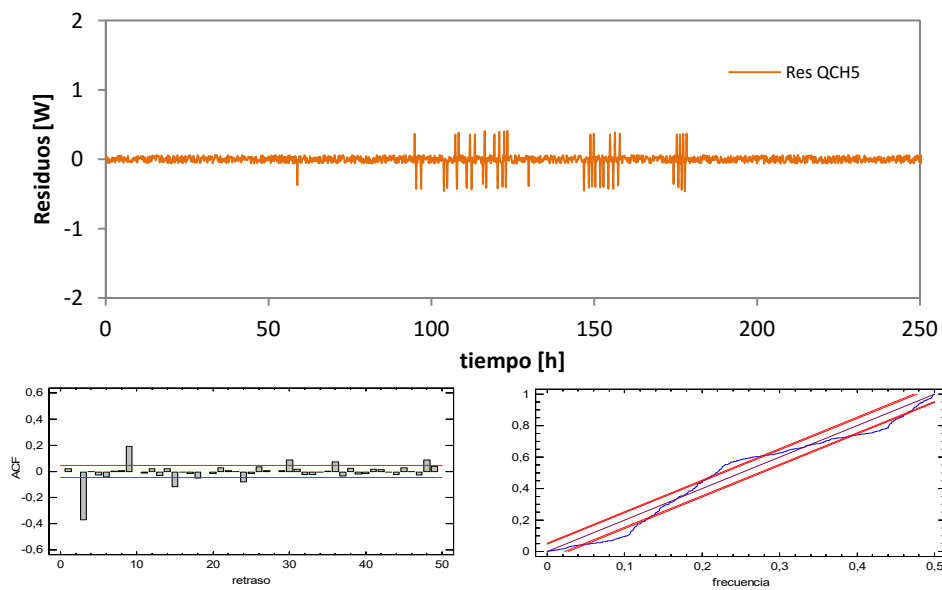


Figura A.72– Análisis del modelo unidimensional de orden 4 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.51 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
$T_{s,c}$	0.2	K	0.001	0.001
$T_{c,e}$	0.5	K	0.002	0.001
Q_{CH5}	0.1	W	0.003	0.001

Tabla A.51 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 4

Modelo 5º orden

En las ecuaciones [A.23] y [A.24] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 5, y en la Tabla A.52 los resultados del modelo y en la Tabla A.53 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \\ dT_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} & \frac{H_5}{C_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_5} & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dW \quad [A.23]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_5(t) \end{bmatrix} + [H_1 \ 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [S_{CH5}]de(t) \quad [A.24]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	0.2	50	500	5.36E-01	1.13E-02	632.3	0.009	0.006
H_2	0.2	50	500	3.92E-01	9.64E-03	41.87	0	0.008
C_1	1	100	500	6.33E+00	2.31E-01	40.736	0	-0.009
C_2	1	100	500	8.64E+00	2.37E-01	14.955	0	0
H_3	0.2	50	500	2.63E+00	8.89E-03	18.54	0.0032	0.007
C_3	1	100	500	2.05E+01	5.09E-01	97.346	0.0057	0.008
H_4	0.2	50	500	5.76E+01	7.28E-03	59.91	0	0
C_4	1	100	500	8.20E+01	4.79E-01	91.086	0.0007	0.006
H_5	0.2	50	500	6.12E+01	2.38E-03	12.09	0	0
C_5	1	100	500	8.94E+00	4.94E-01	77.833	0	0
H_6	0.2	50	500	5.24E+01	4.53E-05	30.298	0	0.005

Tabla A.52 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 5

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅	C ₅	H ₆
H ₁	1										
H ₂	0.23	1									
C ₁	0.32	0.29	1								
C ₂	0.27	0.28	0.26	1							
H ₃	0.19	0.41	0.41	0.18	1						
C ₃	0.28	0.33	0.18	0.24	0.05	1					
H ₄	0.08	0.23	0.34	0.15	0.32	0.02	1				
C ₄	0.30	0.26	0.30	0.24	0.41	0.28	0.32	1			
H ₅	0.04	0.02	0.48	0.24	0.19	0.33	0.29	0.13	1		
C ₅	0.13	0.21	0.24	0.31	0.16	0.28	0.19	0.31	0.09	1	
H ₆	0.04	0.28	0.20	0.38	0.17	0.22	0.31	0.25	0.23	0.01	1

Tabla A.53 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 5

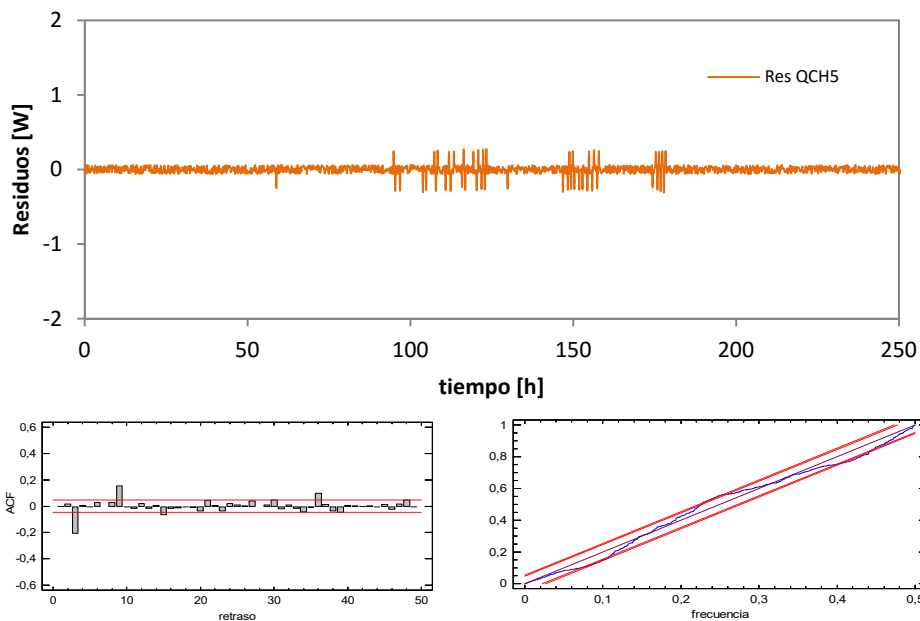


Figura A.73– Análisis del modelo unidimensional de orden 5 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.54 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
T _{s,c}	0.2	K	0.001	0.001
T _{c,e}	0.5	K	0.001	0.001
Q _{CH5}	0.1	W	0.002	0.001

Tabla A.54 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 5

Modelo 6º orden

En las ecuaciones [A.25] y [A.26] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 6, y en la Tabla A.55 los resultados del modelo y en la Tabla A.56 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \\ dT_5 \\ dT_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} & \frac{H_5}{C_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_5} & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_5} & \frac{H_6}{C_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_6}{C_6} & \frac{-(H_6 + H_7)}{C_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} dt \quad [A.25]$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma] dW$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_5(t) \\ T_6(t) \end{bmatrix} + [H_1 \ 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [SCH5] de(t) \quad [A.26]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	50	500	5.20E-01	1.46E-03	13.720	-0.0034	0.0025
H ₂	0.2	50	500	3.60E-01	9.03E-03	20.43	0.0022	0.0046
C ₁	1	100	500	5.43E+01	1.05E-01	96.59	0	0
C ₂	1	100	500	2.01E+01	1.90E-01	27.4	0	-0.0003
H ₃	0.2	50	500	8.75E+00	1.24E-02	25.22	-0.0045	0.0037
C ₃	1	100	500	1.02E+01	8.43E-01	34.191	0	0
H ₄	0.2	50	500	3.22E+01	1.31E-02	97.3	0	0.0044
C ₄	1	100	500	1.63E+01	2.75E-01	7.243	0	0
H ₅	0.2	50	500	6.94E+01	6.58E-03	16.056	0.0048	0.0046
C ₅	1	100	500	2.71E+00	5.52E-01	56.77	-0.0043	0.0020
H ₆	0.2	50	500	5.40E+01	6.74E-03	97.9	0	0
C ₆	1	100	500	2.41E+01	7.86E-01	57.64	0	0
H ₇	0.2	50	500	1.42E+02	4.70E-03	40.69	0.0042	0

Tabla A.55 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 6

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅	C ₅	H ₆	C ₆	H ₇
H ₁	1												
H ₂	0.34	1											
C ₁	0.33	0.01	1										
C ₂	0.30	0.19	0.30	1									
H ₃	0.19	0.19	0.33	0.25	1								
C ₃	0.16	0.23	0.25	0.02	0.24	1							
H ₄	0.32	0.17	0.06	0.20	0.19	0.18	1						
C ₄	0.18	0.28	0.27	0.42	0.29	0.30	0.21	1					
H ₅	0.24	0.17	0.30	0.28	0.18	0.30	0.29	0.31	1				
C ₅	0.21	0.24	0.29	0.36	0.27	0.32	0.21	0.40	0.39	1			
H ₆	0.20	0.18	0.25	0.50	0.39	0.30	0.46	0.21	0.02	0.40	1		
C ₆	0.19	0.29	0.23	0.39	0.22	0.17	0.30	0.23	0.24	0.46	0.29	1	
H ₇	0.19	0.28	0.40	0.18	0.07	0.14	0.31	0.12	0.28	0.26	0.28	0.28	1

Tabla A.56 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 6

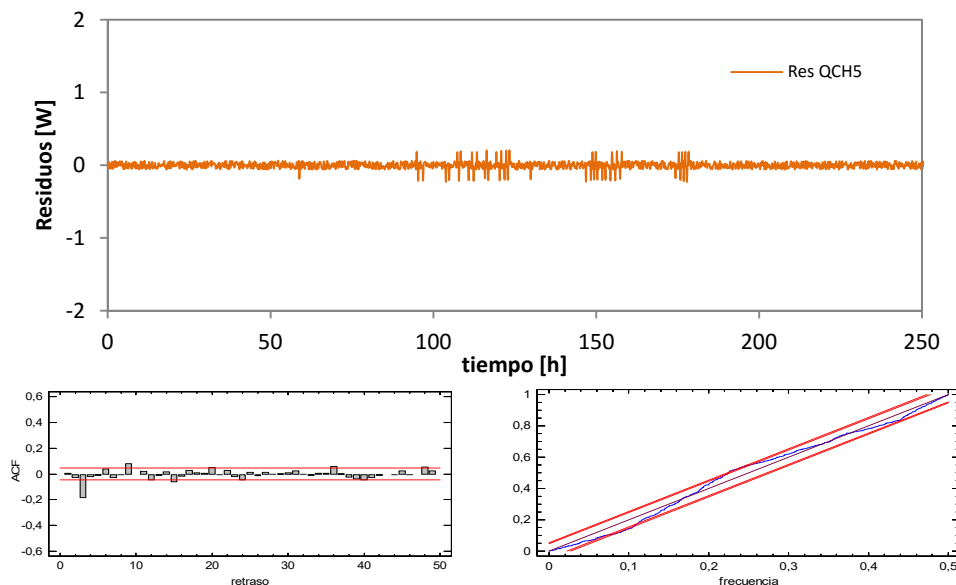


Figura A.74– Análisis del modelo unidimensional de orden 6 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.57 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
T _{s,c}	0.2	K	0.001	0.001
T _{c,e}	0.5	K	0.001	0.001
Q _{CH5}	0.1	W	0.002	0.001

Tabla A.57 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 6

En la Tabla A.58 se recoge el resumen de resultados obtenidos en el proceso de análisis del modelo de flujo unidimensional en el muro de calibración. Estos mismos resultados se muestran en las gráficas de la Figura A.75.

N	1	2	3	4	5	6	media	σ
H [W/K]	0.212	0.219	0.207	0.203	0.206	0.205	0.205	0.006
C [MJ/K]	0.078	0.079	0.076	0.076	0.076	0.077	0.076	0.001
e [%]	3.4	6.5	0.9	-1.3	0.4	0.0		
	2.4	3.6	-1.0	0.1	0.2	0.7		

Tabla A.58 – Resultados del proceso de identificación para la transmitancia y capacidad térmica de la zona central del muro de calibración

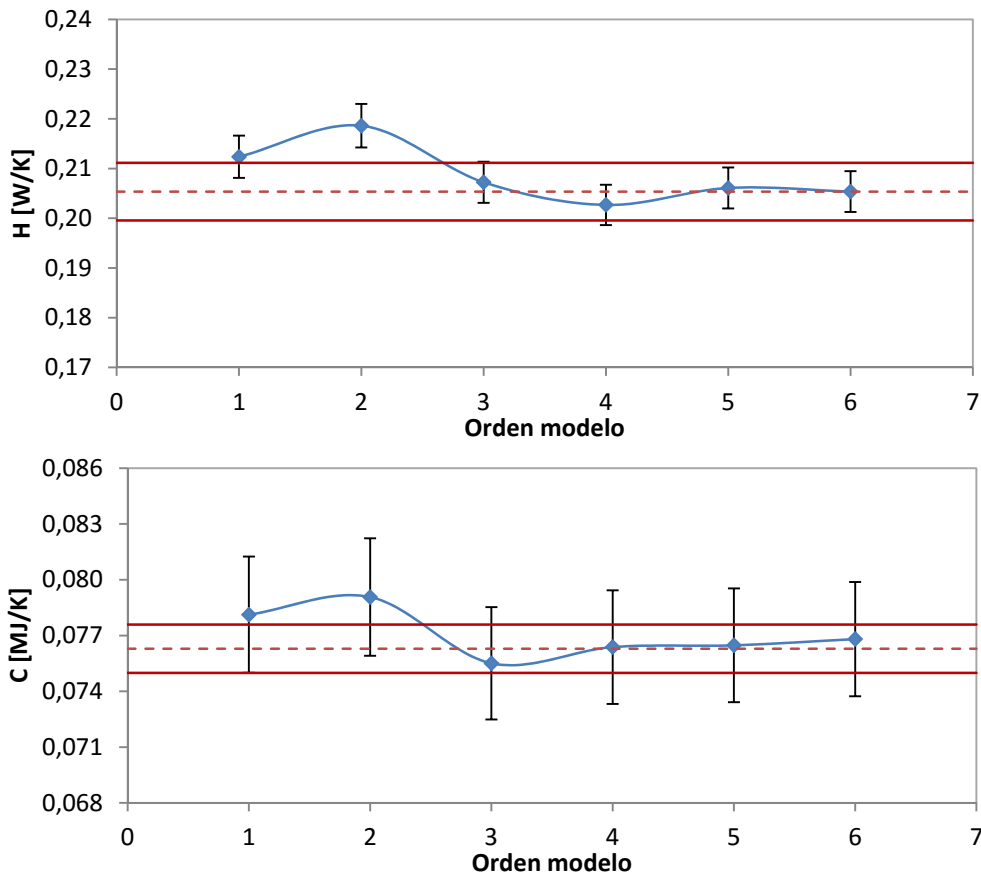


Figura A.75 – Resultados en función del orden del modelo, para el flujo central del muro de calibración

En vista de los resultados, se considera que el modelo óptimo para caracterizar el muro de calibración es el modelo de tercer orden, ya que presenta un comportamiento próximo al de ruido blanco y los resultados de H y C se ajustan a los valores medios obtenidos y están dentro del rango de la desviación estándar. Otro indicativo de que este modelo ya es suficiente para la caracterización del muro es que presenta valores de conductancia muy elevados y valores de capacidades térmicas muy reducidos, valores despreciables dentro del valor final. Esta respuesta es típica en los modelos de identificación de parámetros, ya que en el momento en el que se obtiene el modelo

mínimo necesario para representar el comportamiento de la muestra bajo estudio, aunque se aumente el orden del modelo no se obtienen mejores resultados, ya que los parámetros añadidos no presentan peso en el resultado al tomar valores muy alejados del valor total. Aún así, la experiencia en el trabajo con herramientas de identificación indica que el mejor modelo es aquel que presenta un orden más del mínimo necesario, esos parámetros que toman valores despreciables le permiten a la herramienta ajustar de una forma más adecuada la función objetivo gracias los grados de libertad añadidos. Pero si estos son muchos, el modelo no aporta mayor mejora, y si un aumento importante en la complejidad y en la posibilidad de cometer errores en el ajuste.

A.3.1.2 Flujo de borde

Para estudiar los efectos de borde que se producen en el muro de calibración se emplea un modelo como el mostrado en la Figura A.68 de tercer orden, como se ha determinado en el apartado anterior. La única diferencia en dicho modelo, definido en las ecuaciones [A.19] y [A.20], es que se emplea el flujo de las *tilas* correspondientes a los grupos CH1, CH2, CH3 y CH4 como función objetivo. A continuación se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros para las tres rutinas de ensayo aplicadas en el proceso de calibración.

Resultados rutina *PULSO*

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	10	500	2.43E+00	1.09E-01	111.7111	-0.0257	0
H ₂	0.2	10	500	1.57E+01	7.09E-01	86.5838	-0.0001	0.0001
C ₁	1	100	500	1.55E+02	2.19E+01	30.1808	-0.0001	0.0002
C ₂	1	100	500	1.09E+02	1.58E+01	8.7806	0.0004	0.0001
H ₃	0.2	10	500	3.04E+00	1.36E-01	1.5244	-0.0004	0

Tabla A.59 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina *PULSO*

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	0.225	1			
C ₁	-0.102	-0.214	1		
C ₂	0.027	0.077	-0.014	1	
H ₃	-0.001	0.102	-0.023	0.332	1

Tabla A.60 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina *PULSO*

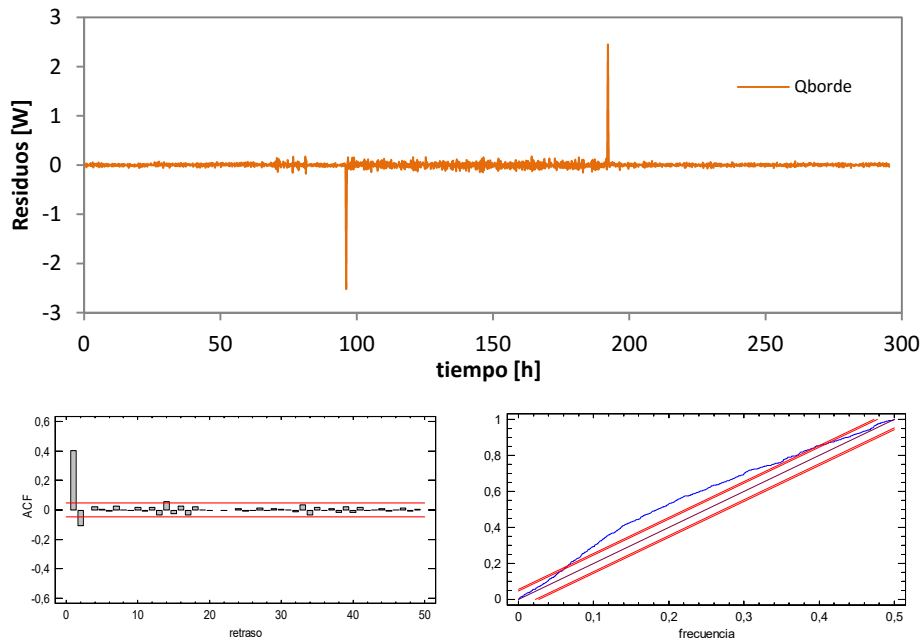


Figura A.76– Análisis del modelo para el flujo de borde del muro de calibración en la rutina PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	10	500	1.27E+00	2.17E-02	10.0296	0	0
H ₂	0.2	10	500	1.22E+00	7.87E-02	2.656	0	0
C ₁	1	100	500	1.46E+02	8.91E+00	6.6086	0	0.2999
C ₂	1	100	500	1.45E+02	1.33E+01	4.4086	0	0.2099
H ₃	0.2	10	500	5.42E+01	1.01E+01	0.9171	0	0.0181

Tabla A.61 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina PRBS

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	0.002	1			
C ₁	0.000	-0.015	1		
C ₂	0.001	-0.004	-0.008	1	
H ₃	-0.001	-0.025	-0.019	0.167	1

Tabla A.62 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina PRBS

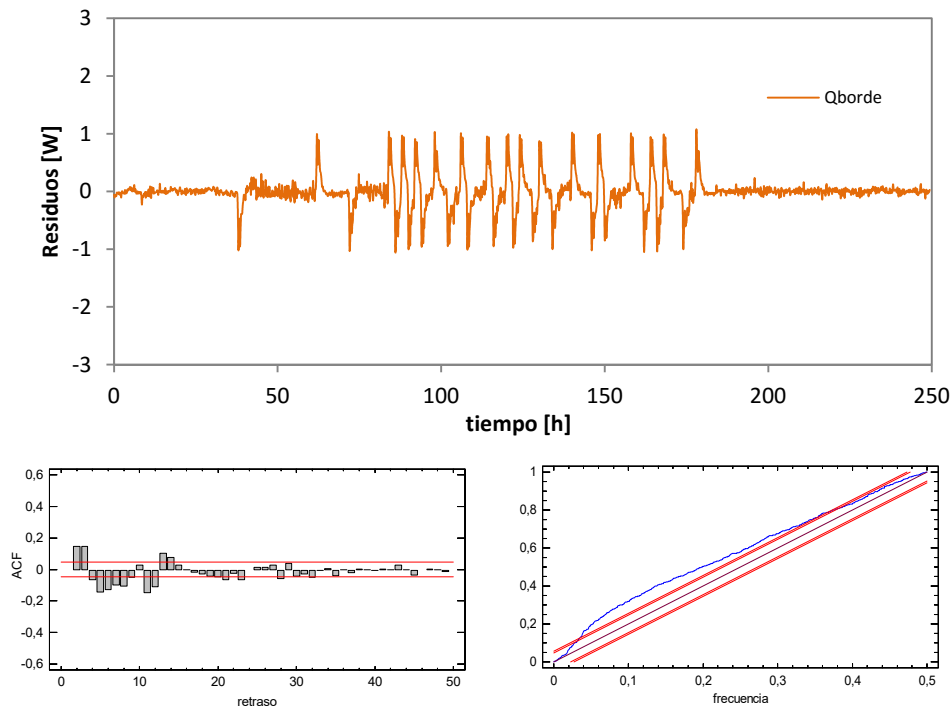


Figura A.77– Análisis del modelo para el flujo de borde del muro de calibración en la rutina PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	10	500	1.28E+00	1.81E-02	16.0003	0	0
H ₂	0.2	10	500	1.16E+00	9.25E-02	2.8419	0.0045	0
C ₁	1	100	500	4.39E+02	2.79E+01	17.729	0	0.0012
C ₂	1	100	500	9.22E+00	5.91E+00	1.7631	0.078	0.0001
H ₃	0.2	10	500	6.29E+01	1.27E+01	1.1185	0.2635	0.0001

Tabla A.63 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina ROLBS

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	-0.010	1			
C ₁	-0.002	-0.057	1		
C ₂	0.107	0.012	-0.007	1	
H ₃	0.012	0.031	0.008	0.097	1

Tabla A.64 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina ROLBS

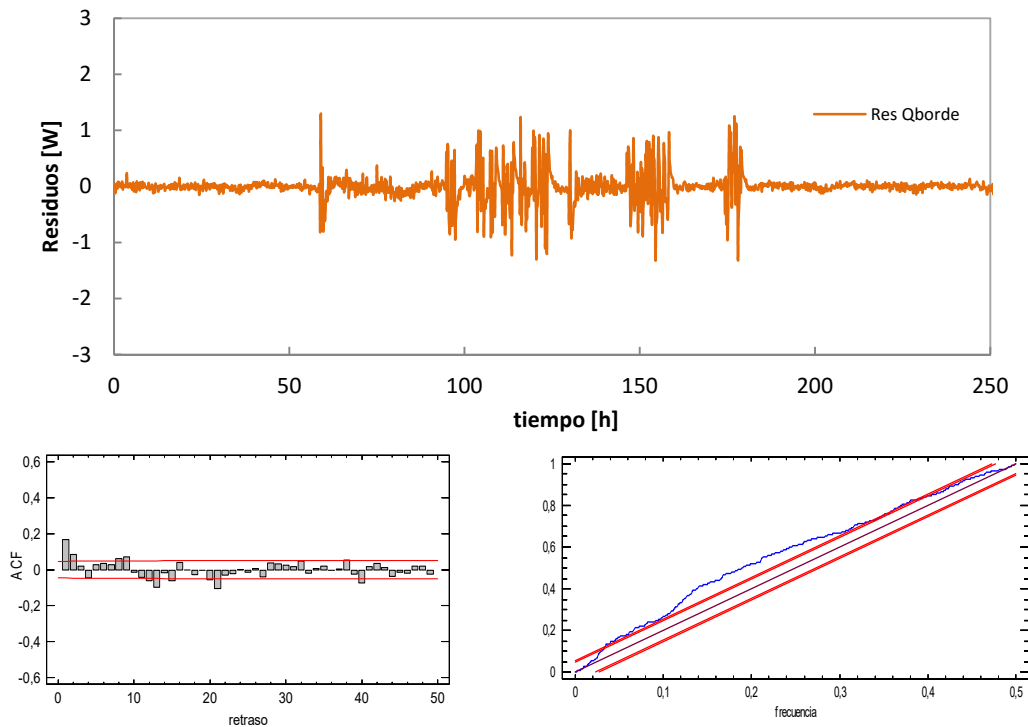


Figura A.78 – Análisis de los efectos de borde del muro de calibración para la excitación ROLBS

En la Tabla A.65 se recoge el resumen de los datos obtenidos en el estudio del flujo de borde que se produce en el muro de calibración.

	H [W/K]	C [MJ/K]
PULSO	0.611	0.277
PRBS	0.607	0.261
ROLBS	0.598	0.274
media	0.605	0.270
σ	0.004	0.005

Tabla A.65 – Resultados del proceso de identificación para la transmitancia y capacidad térmica de la zona de borde del muro de calibración

A.3.1.3 Modelo a escala de celda

A continuación se muestran los resultados del proceso de identificación para el modelo completo de la celda con el muro de calibración teniendo en cuenta la zona de flujo unidimensional y la zona de flujo de borde, ver Figura A.79. En [A.27] y [A.28] se indica las ecuaciones que representan al modelo. Como variables de excitación del modelo se emplean las medidas de potencia inyectada en la sala de ensayos, flujo de calor de la envolvente, temperatura del ambiente exterior y radiación solar incidente sobre la

superficie de la muestra, $[P, Q_{HFS,e}, T_e, G_v]$. Y como funciones objetivo se emplea la temperatura de ambiente interior de la sala de ensayos, la temperatura de la superficie interior de la envoltura, la temperatura interior y exterior del muro de calibración, $[T_i, T_{s,c}, T_{s,e}, T_{c,e}]$.

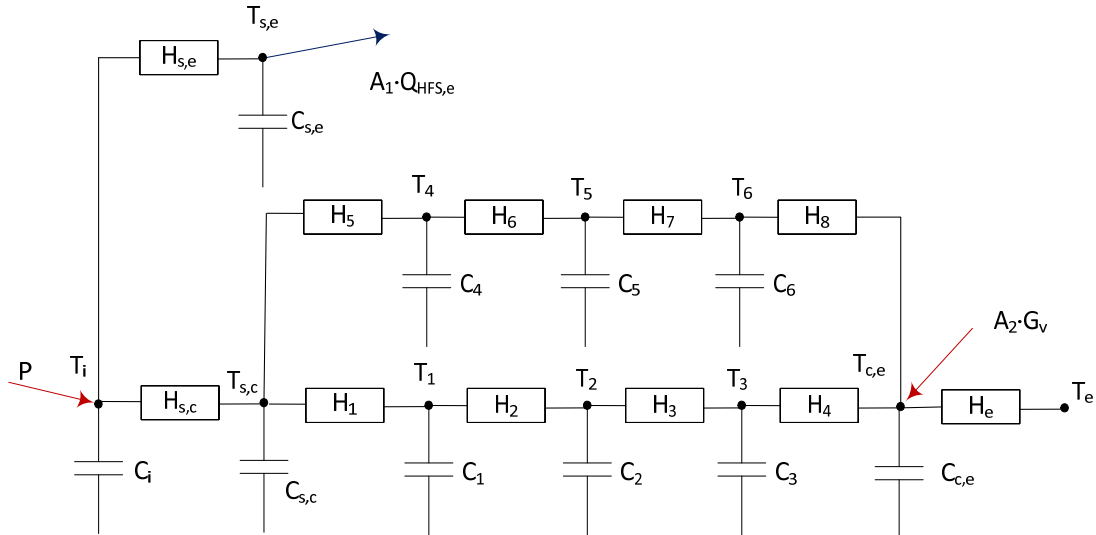


Figura A.79 – Modelo de caracterización para el muro de calibración

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{c,e} \\ dT_4 \\ dT_5 \\ dT_6 \\ dT_{s,e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_{s,c} + H_{s,e})}{C_i} & \frac{H_{s,c}}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_{s,e}}{C_i} \\ \frac{H_{s,c}}{C_{s,c}} & \frac{-(H_{s,e} + H_1 + H_5)}{C_{s,c}} & \frac{H_1}{C_{s,c}} & 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_{s,c}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_1}{C_1} & \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_{c,e}} & \frac{-(H_4 + H_6)}{C_{c,e}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_4} & \frac{H_6}{C_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-(H_6 + H_7)}{C_5} & \frac{H_7}{C_5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_7}{C_6} & 0 & \frac{-(H_7 + H_8)}{C_6} & 0 & 0 \\ \frac{H_{s,e}}{C_{s,e}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-H_{s,e}}{C_{s,e}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{c,e} \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_{s,e} \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-A_1}{C_{s,e}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} dt + [e] dt \quad [A.27]$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,c}^m \\ T_{c,e}^m \\ T_{s,e}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{c,e} \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_{s,e} \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} + [e] \quad [A.28]$$

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	df/dPar	dPen/dPar
H _{s,c}	10	70	150	5.96E+01	8.01E+00	33.4676	0	0
H _{s,e}	100	350	500	2.40E+02	6.81E+00	22.2749	-0.0002	-0.0001
C _i	10	40	100	3.06E+01	4.76E+00	1.5296	-0.0005	-0.0016
C _{s,c}	100	280	400	2.72E+02	9.94E+00	4.0943	0.0016	0
H ₁	0.2	1	100	2.55E+01	5.28E+00	5.7592	0.0007	0
H ₅	0.2	10	500	1.53E+00	2.33E-01	7.0812	-0.0014	-0.0008
C ₁	1	50	150	3.86E+01	4.28E+00	3.4428	0.0006	0.0003
H ₂	0.2	1	100	4.35E-01	2.36E-02	24.3100	-0.0004	-0.0001
C ₂	1	50	150	1.41E+01	1.49E+00	7.8405	0.0002	0
H ₃	0.2	1	100	4.37E-01	6.09E-02	3.0381	0.0006	0.0002
C ₃	1	50	150	4.22E+01	5.72E+00	0.6293	-0.0005	-0.0002
H ₄	0.2	1	100	6.23E+01	3.50E+00	10.0604	-0.0006	-0.0003
C _{c,e}	1	50	100	4.43E+01	1.74E+00	4.1492	0.0001	0.0022
H _e	5	25	50	1.94E+01	4.24E-01	13.7667	0	-0.0013
C ₄	10	100	500	2.95E+02	5.69E+01	0.3277	0.0001	0.0004
H ₆	0.2	10	500	2.37E+00	1.51E-01	13.7608	0.0002	-0.0007
C ₅	10	100	500	5.04E+01	4.19E+01	3.7894	0.0008	-0.0004
H ₇	0.2	10	500	1.15E+01	2.46E-01	10.2720	0.0022	-0.0004
H ₈	0.2	10	500	2.28E+00	2.47E-01	31.9214	-0.0011	0
C ₆	10	100	500	6.50E+01	2.73E+01	24.9670	0.0004	-0.0004
C _{s,e}	500	900	1500	8.73E+02	3.43E+01	0.0186	-0.0005	0.0020
A ₂	0.1	0.5	0.9	3.21E-01	7.48E-02	24.3490	0	0
A ₁	0.9	1	1.1	1.04E+00	4.61E-03	20.4272	-0.0004	0.0011

Tabla A.66 – Resultados identificación parámetros para la rutina PULSO en el modelo completo de muro de calibración

	H _{s,c}	H _{s,e}	C _i	C _{s,c}	H ₁	H ₅	C ₁	H ₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C _{c,e}	H _e	C ₄	H ₆	C ₅	H ₇	H ₈	C ₆	C _{s,e}	A ₂	A ₁		
H _{s,c}	1																								
H _{s,e}	0.5	1																							
C _i	0.0	0.6	1																						
C _{s,c}	0.2	0.8	0.5	1																					
H ₁	0.1	0.3	0.7	0.5	1																				
H ₅	0.2	0.4	0.3	0.9	0.1	1																			
C ₁	0.2	0.1	0.2	0.7	0.9	0.8	1																		
H ₂	0.2	0.8	0.3	0.7	0.3	0.7	0.5	1																	
C ₂	0.3	0.9	0.7	0.7	0.8	1.0	0.4	0.0	1																
H ₃	0.3	0.8	0.2	0.1	0.7	0.4	1.0	0.9	0.1	1															
C ₃	0.5	0.7	0.1	0.2	0.2	0.8	0.2	0.7	0.3	0.1	1														
H ₄	0.2	0.4	0.7	0.3	0.6	0.0	0.1	0.8	0.7	0.6	0.4	1													
C _{c,e}	0.5	0.9	0.8	0.5	0.4	0.9	0.4	0.7	0.1	0.8	0.1	0.7	1												
H _e	0.8	0.4	0.6	0.5	0.2	0.7	0.2	0.5	0.9	0.2	0.6	0.2	0.9	1											
C ₄	1.0	0.8	0.4	0.5	0.8	0.9	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.6	0.4	1										
H ₆	0.7	1.0	0.6	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	0.1	0.9	0.4	0.8	0.0	0.9	0.1	1									
C ₅	0.1	0.0	0.3	0.9	0.9	0.4	0.7	1.0	1.0	0.1	1.0	0.5	0.6	0.4	0.7	0.4	1								
H ₇	0.7	0.2	0.5	0.7	0.1	0.6	0.2	0.2	0.7	0.6	0.2	0.7	0.5	0.5	0.6	0.1	0.6	1							
H ₈	0.7	0.5	0.1	0.5	0.2	0.3	0.8	0.3	0.0	1.0	0.8	0.3	0.4	0.1	1.0	0.6	0.1	0.6	1						
C ₆	0.9	0.2	0.5	0.4	0.3	0.6	0.7	1.0	0.3	0.7	0.0	0.0	0.3	0.2	0.3	0.9	1.0	0.6	0.0	1					
C _{s,e}	0.2	0.5	0.9	0.3	0.9	0.4	0.3	0.1	0.4	0.4	0.7	0.8	0.8	0.7	0.4	0.6	0.7	0.6	0.2	0.7	1				
A ₂	0.0	0.5	0.8	0.1	1.0	0.4	0.9	0.8	0.2	0.1	0.2	0.4	0.9	0.7	0.4	0.8	0.6	0.0	0.0	0.3	0.2	1			
A ₁	0.9	0.9	0.8	0.9	0.2	0.6	0.5	0.7	0.2	0.6	0.7	0.6	0.9	0.6	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.2	1		

Tabla A.67 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro calibración para la rutina PULSO

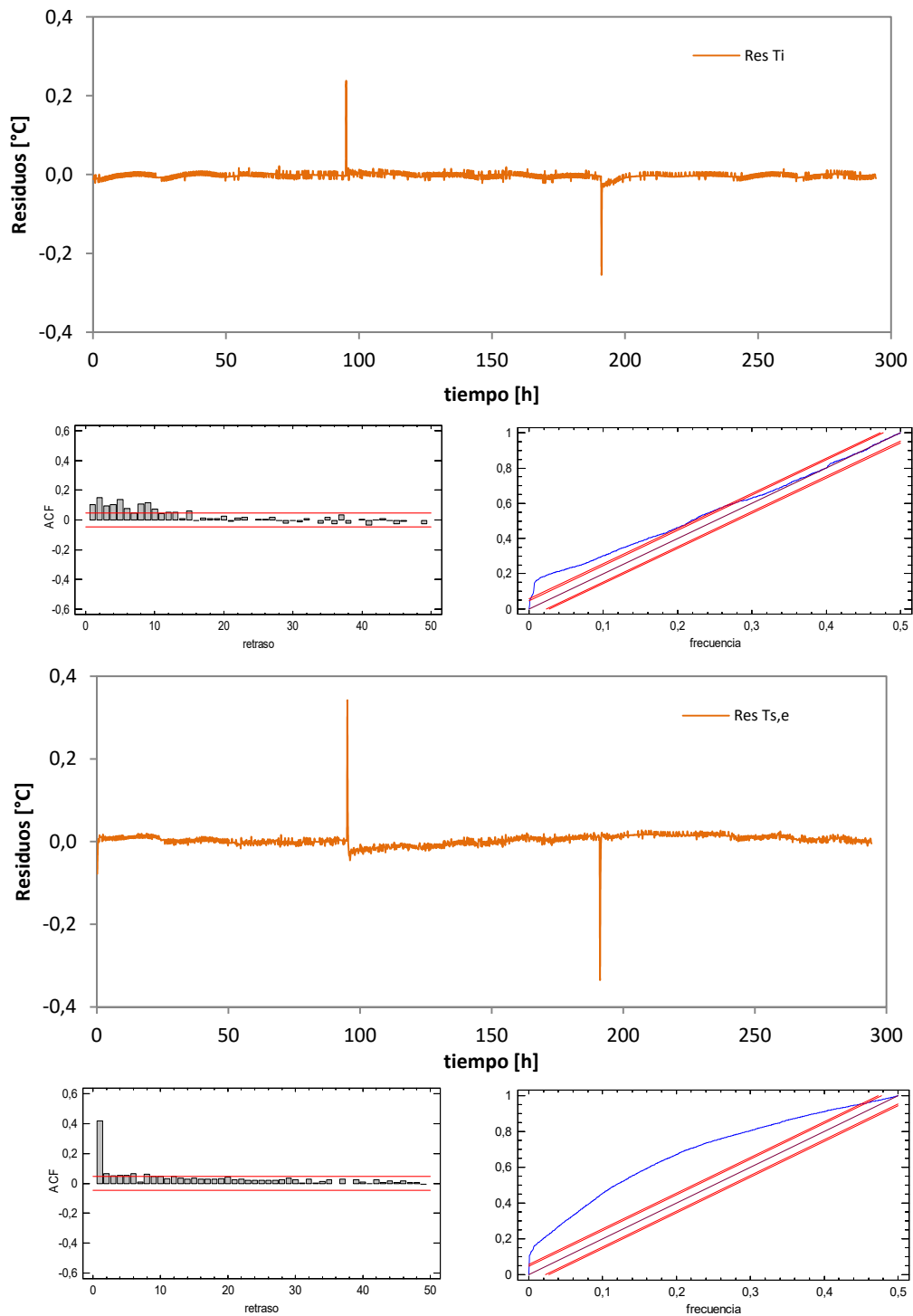


Figura A.80 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación PULSO

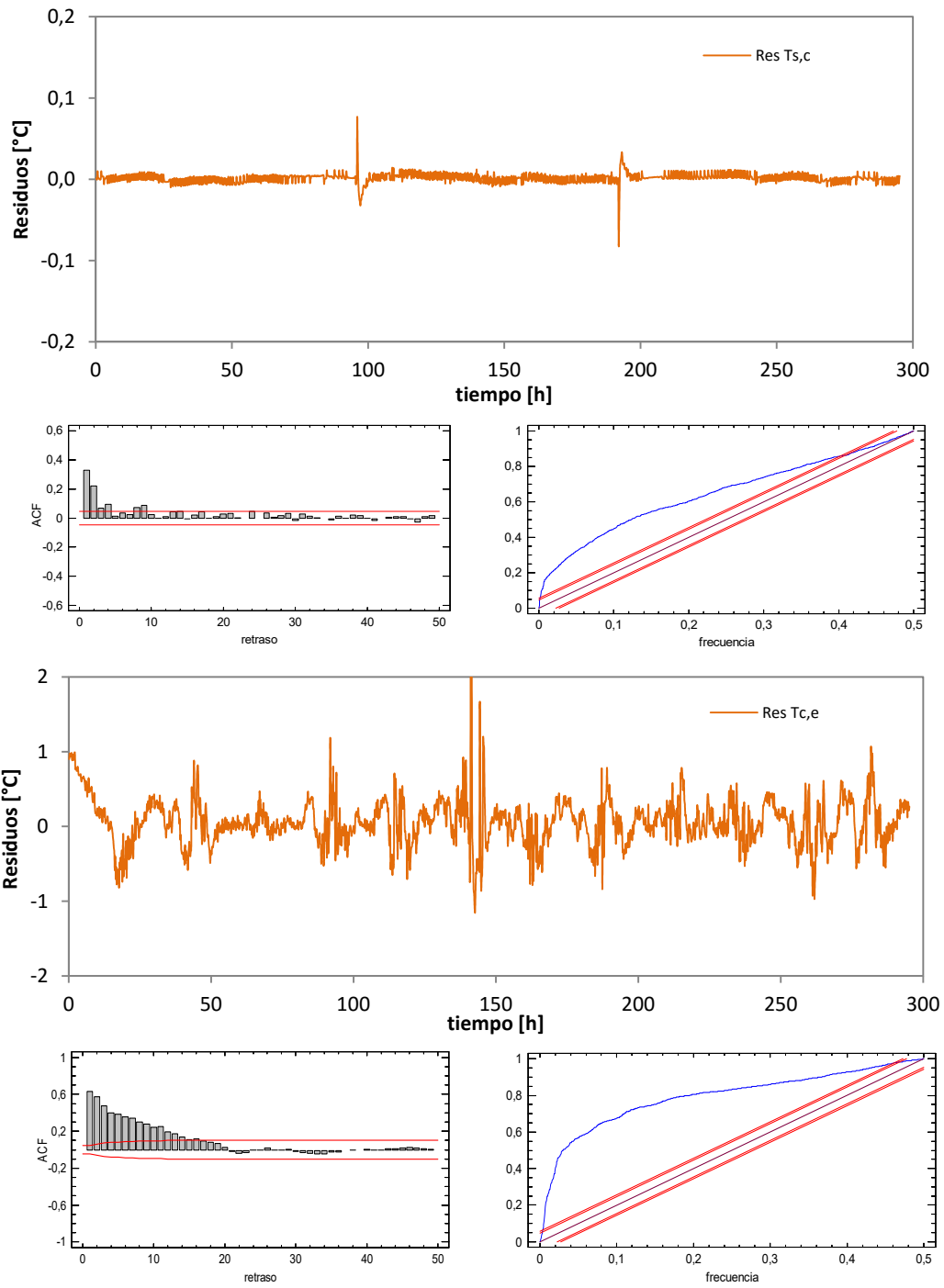


Figura A.81 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H _{s,c}	10	70	150	4.77E+01	3.06E+00	97.223	0.0019	0.0034
H _{s,e}	100	350	500	3.52E+02	8.69E+00	57.829	-0.0025	0
C _i	10	40	100	7.51E+01	9.02E+00	88.065	0.002	-0.003
C _{s,c}	100	280	400	2.43E+02	8.83E+00	2.313	-0.0037	-0.0029
H ₁	0.2	1	100	1.45E+01	2.68E+00	63.97	0.0047	-0.0004
H ₅	0.2	10	500	6.59E-01	7.44E-02	81.109	0.0028	0.0019
C ₁	1	50	150	1.37E+01	4.96E+00	11.6455	0.0036	0.0031
H ₂	0.2	1	100	2.21E-01	1.90E-02	2.523	0.0021	0.0036
C ₂	1	50	150	6.09E+01	9.11E+00	0.1786	0.0030	-0.003
H ₃	0.2	1	100	3.65E+00	3.73E-02	74.842	-0.0045	0.0037
C ₃	1	50	150	6.33E+01	5.35E+00	28.295	0.0033	0.0020
H ₄	0.2	1	100	4.08E+00	1.83E-01	56.452	-0.0017	0.0043
C _{c,e}	1	50	100	5.84E+00	3.96E+00	29.117	-0.0015	-0.0027
H _e	5	25	50	2.30E+01	8.97E+00	9.4336	0.0022	0.0046
C ₄	10	100	500	5.02E+02	5.23E+00	75.264	-0.0033	-0.0015
H ₆	0.2	10	500	1.43E+02	9.02E-02	47.049	0.0006	-0.0034
C ₅	10	100	500	1.45E+00	4.69E+01	39.480	-0.0001	-0.0033
H ₇	0.2	10	500	8.90E+01	1.77E-01	51.810	0.0029	-0.0022
H ₈	0.2	10	500	1.10E+02	6.04E-01	31.126	0.0005	-0.003
C ₆	10	100	500	4.40E+02	3.06E+01	1.4267	0.0028	0.0001
C _{s,e}	500	900	1500	9.35E+02	8.89E+00	87.365	-0.0034	-0.0029
A ₂	0.1	0.5	0.9	2.66E-01	2.32E-02	4.8759	-0.0049	-0.0011
A ₁	0.9	1	1.1	2.65E+01	4.25E+00	59.336	-0.0012	0.002

Tabla A.68 – Resultados identificación parámetros para la rutina PRBS en el modelo completo de muro de calibración

	H _{s,c}	H _{s,e}	C _i	C _{s,c}	H ₁	H ₅	C ₁	H ₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C _{c,e}	H _e	C ₄	H ₆	C ₅	H ₇	H ₈	C ₆	C _{s,e}	A ₂	A ₁	
H _{s,c}	1																							
H _{s,e}	0.1	1																						
C _i	0.8	0.7	1																					
C _{s,c}	0.1	0.4	0.1	1																				
H ₁	0.8	0.5	0.9	0.5	1																			
H ₅	0.6	0.1	0.3	0.4	0.7	1																		
C ₁	0.9	0.8	0.3	0.3	0.7	0.0	1																	
H ₂	0.1	0.6	0.3	0.0	0.5	0.8	0.4	1																
C ₂	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.4	0.3	0.9	1															
H ₃	0.2	0.1	0.5	1.0	0.3	0.0	0.8	0.0	0.6	1														
C ₃	0.9	0.2	0.7	1.0	0.3	0.4	0.7	0.2	0.3	0.0	1													
H ₄	0.8	0.6	0.1	0.9	0.1	0.5	0.3	0.6	1.0	0.1	0.9	1												
C _{c,e}	0.9	0.2	0.7	0.2	0.5	0.5	0.9	0.0	0.8	0.6	0.7	0.4	1											
H _e	0.9	0.4	0.2	0.1	1.0	0.4	0.6	0.5	0.5	0.7	0.8	0.4	0.1	1										
C ₄	0.8	0.9	0.1	0.5	0.7	0.2	0.8	0.8	0.7	0.4	0.9	0.7	0.1	0.1	1									
H ₆	0.6	0.7	0.5	0.7	0.5	0.4	0.5	0.3	0.8	0.1	0.3	0.8	0.9	0.7	0.8	1								
C ₅	0.8	0.9	0.8	0.5	0.8	0.8	0.0	0.5	0.6	1.0	0.3	0.7	0.8	0.8	0.6	0.0	1							
H ₇	0.9	0.6	0.8	0.7	0.2	0.4	0.8	0.0	0.1	0.2	0.1	0.5	0.0	0.4	0.4	0.4	1.0	1						
H ₈	0.3	0.4	0.1	1.0	0.5	0.4	0.2	0.4	0.5	0.8	0.7	0.0	1.0	0.8	0.9	0.3	0.4	0.5	1					
C ₆	0.9	0.6	0.1	0.8	0.1	0.1	0.6	0.3	0.4	0.9	0.8	0.3	0.2	0.1	0.4	0.8	0.4	0.4	0.9	1				
C _{s,e}	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	1.0	1.0	0.5	0.4	0.6	0.2	0.2	0.1	0.4	0.9	0.9	0.7	0.9	0.2	1			
A ₂	0.2	0.4	0.9	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.9	0.7	0.8	0.3	0.9	0.7	0.2	0.2	0.2	0.0	0.8	1.0	0.9	1		
A ₁	0.1	0.8	0.3	0.3	0.4	0.9	0.3	0.0	0.9	0.3	0.4	0.3	0.6	0.3	0.6	0.5	0.5	0.3	0.7	0.8	0.6	0.5	1	

Tabla A.69 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro calibración para la rutina PRBS

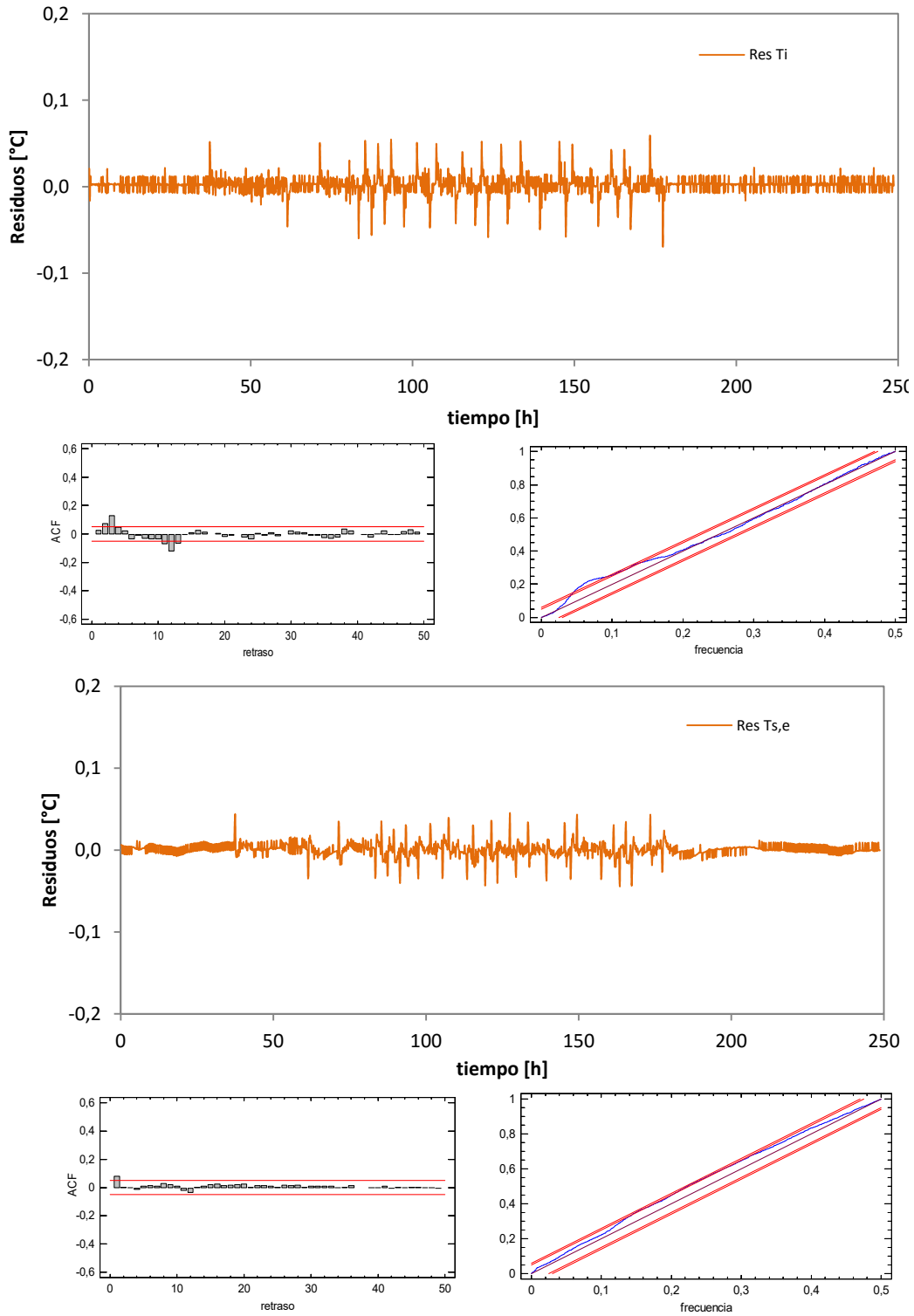


Figura A.82 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación PRBS

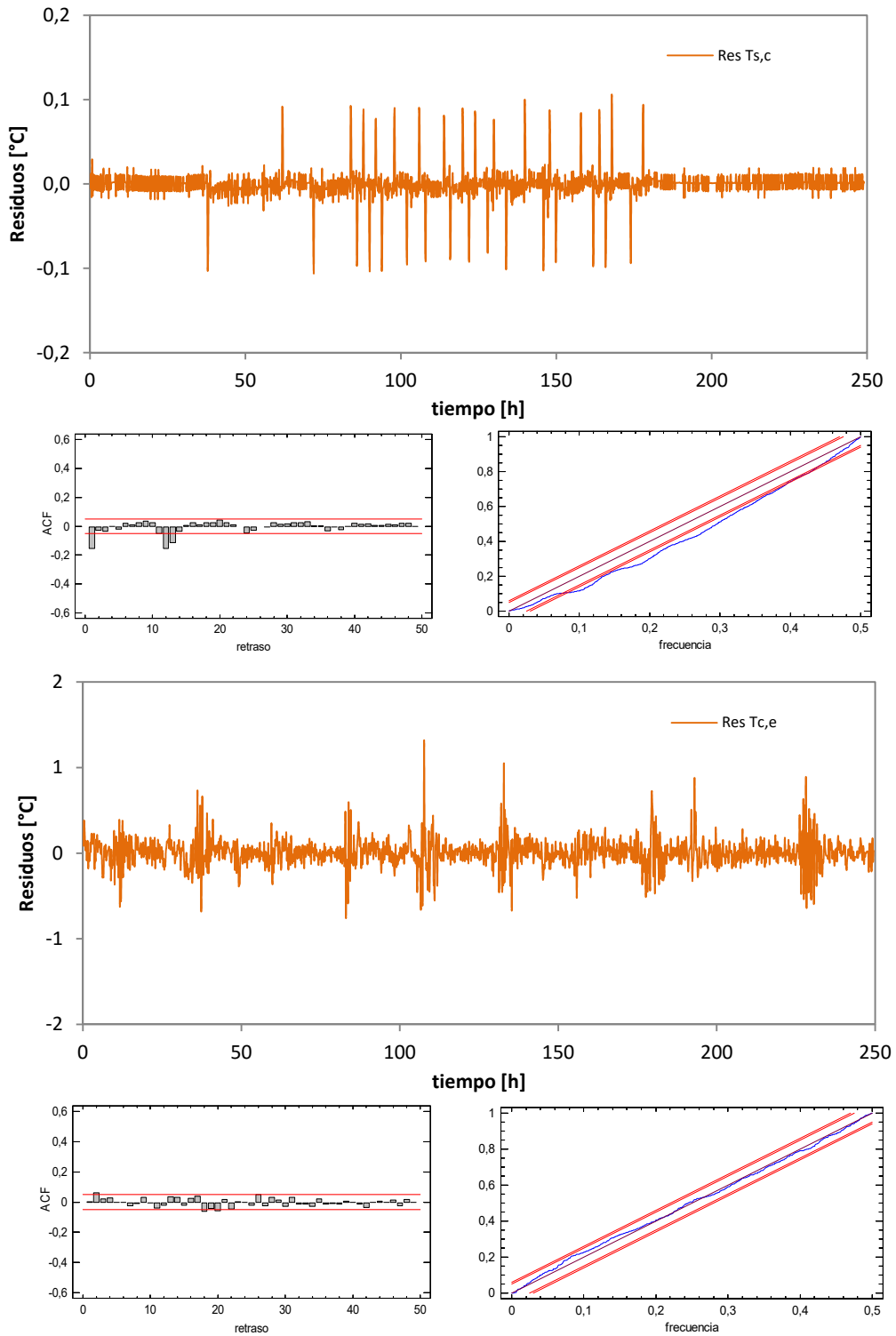


Figura A.83 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H _{s,c}	10	70	150	5.95E+01	6.67E+00	77.292	0.0024	0
H _{s,e}	100	350	500	3.98E+02	8.27E+00	85.170	0	0
C _i	10	40	100	6.83E+01	1.82E+00	9.2447	-0.0032	0.0024
C _{s,c}	100	280	400	2.99E+02	2.00E+00	10.109	-0.0026	0
H ₁	0.2	1	100	6.17E+00	2.33E+00	7.456	0.0019	0.0047
H ₅	0.2	10	500	4.62E+00	1.27E+00	5.7969	0.0018	0.0029
C ₁	1	50	150	3.74E+01	4.67E+00	41.803	0.0049	-0.0033
H ₂	0.2	1	100	2.54E-01	2.94E-02	71.925	0	0.0017
C ₂	1	50	150	6.11E+01	1.22E+01	96.821	0.0033	-0.0047
H ₃	0.2	1	100	3.11E+00	1.70E-01	3.993	-0.0021	0.0012
C ₃	1	50	150	5.29E+00	2.74E+00	89.368	-0.0042	0.0029
H ₄	0.2	1	100	2.89E+01	2.25E+00	59.850	0.0045	-0.0009
C _{c,e}	1	50	100	2.66E+00	9.54E-01	55.511	0.0042	0
H _e	5	25	50	2.11E+01	4.93E+00	33.4387	-0.0026	0
C ₄	10	100	500	2.91E+02	1.88E+01	18.947	0	0.0029
H ₆	0.2	10	500	1.83E+00	1.25E-01	90.754	-0.0016	-0.0034
C ₅	10	100	500	3.10E+01	1.06E+01	21.289	0.0029	0
H ₇	0.2	10	500	1.25E+00	2.08E-01	58.376	0	0.0020
H ₈	0.2	10	500	5.47E+01	2.16E-01	49.605	0.0031	0.0008
C ₆	10	100	500	8.48E+01	3.12E+01	60.642	0	-0.0041
C _{s,e}	500	900	1500	9.32E+02	7.50E+00	79.204	-0.0048	0.0019
A ₂	0.1	0.5	0.9	2.98E-01	4.56E-03	91.854	-0.0025	0.0046
A ₁	0.9	1	1.1	9.64E-01	8.33E-02	0.1302	0.0038	0.0017

Tabla A.70 – Resultados identificación parámetros para la rutina ROLBS en el modelo completo de muro de calibración

	H _{s,c}	H _{s,e}	C _i	C _{s,c}	H ₁	H ₅	C ₁	H ₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C _{c,e}	H _e	C ₄	H ₆	C ₅	H ₇	H ₈	C ₆	C _{s,e}	A ₂	A ₁	
H _{s,c}	1																							
H _{s,e}	0.3	1																						
C _i	0.6	0.9	1																					
C _{s,c}	0.1	1.0	0.1	1																				
H ₁	0.3	0.8	0.3	0.8	1																			
H ₅	0.3	0.7	0.5	0.6	0.6	1																		
C ₁	0.2	0.3	0.8	0.8	0.6	0.2	1																	
H ₂	0.9	0.4	0.2	0.5	0.2	0.9	0.9	1																
C ₂	0.8	0.8	0.3	0.3	0.0	0.9	0.3	0.6	1															
H ₃	0.9	0.3	1.0	0.8	0.6	0.7	0.6	0.9	0.4	1														
C ₃	0.3	0.4	0.6	0.5	0.2	0.8	0.5	0.1	0.2	0.3	1													
H ₄	0.6	0.4	0.5	0.0	0.7	0.2	0.8	0.4	0.2	0.2	0.9	1												
C _{c,e}	0.4	0.7	0.7	0.6	0.7	0.2	0.0	0.9	0.9	0.9	0.1	0.8	1											
H _e	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	1.0	0.3	0.9	0.2	0.8	0.7	0.2	1										
C ₄	0.8	0.8	0.3	0.1	0.7	0.1	0.5	0.2	0.6	0.6	0.7	0.5	0.3	1.0	1									
H ₆	0.4	0.1	0.9	0.0	0.9	0.1	0.0	0.8	0.0	0.2	0.2	0.2	0.7	0.7	0.2	1								
C ₅	0.2	0.9	0.6	0.5	0.7	0.4	0.5	0.8	0.3	0.6	0.2	0.4	0.5	0.6	0.1	0.4	1							
H ₇	0.8	0.6	0.1	0.4	0.3	0.2	1.0	0.2	0.4	0.5	0.8	0.5	0.1	0.3	0.1	0.8	0.2	1						
H ₈	0.0	0.1	0.9	0.0	0.3	0.2	0.3	0.2	0.4	0.5	0.4	0.7	0.4	0.9	0.8	0.7	0.5	0.7	1					
C ₆	0.8	0.9	0.6	0.8	0.2	0.7	0.1	0.3	0.2	0.4	0.8	0.8	0.1	0.4	0.5	0.9	0.4	0.9	0.6	1				
C _{s,e}	0.9	0.4	0.3	1.0	0.3	0.1	0.0	0.9	0.1	0.8	0.6	0.6	0.2	0.2	0.6	0.1	0.6	0.7	0.8	0.6	1			
A ₂	0.8	0.3	0.0	0.6	1.0	0.8	1.0	0.9	0.7	0.7	1.0	0.8	0.1	0.8	0.4	0.2	0.7	0.8	0.4	0.4	0.2	1		
A ₁	0.7	0.0	0.2	0.8	0.1	0.1	0.6	0.8	0.3	0.3	0.7	0.6	0.5	0.8	0.8	0.9	0.0	1.0	0.3	0.1	1.0	0.7	1	

Tabla A.71 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro calibración para la rutina ROLBS

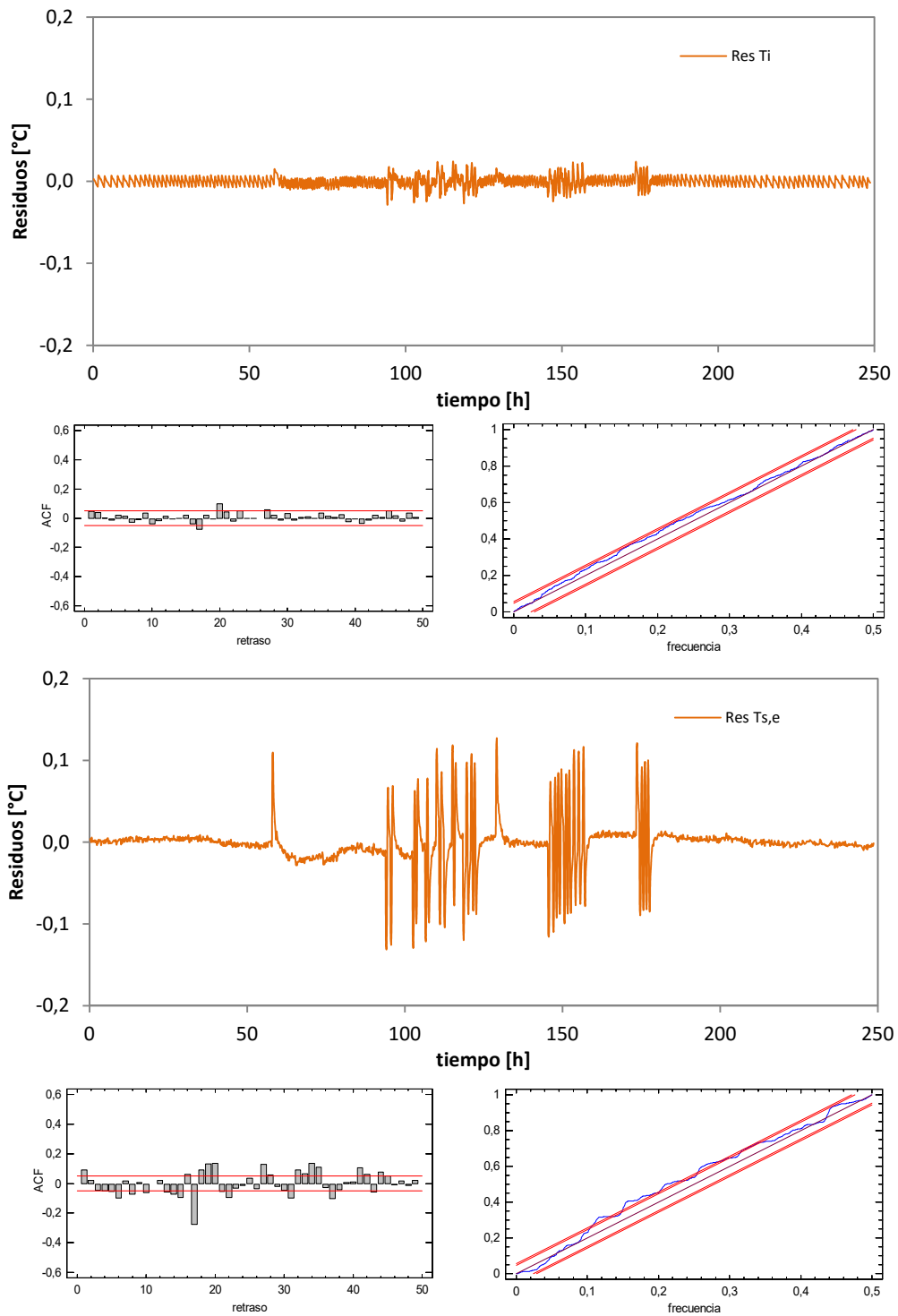


Figura A.84 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación ROLBS

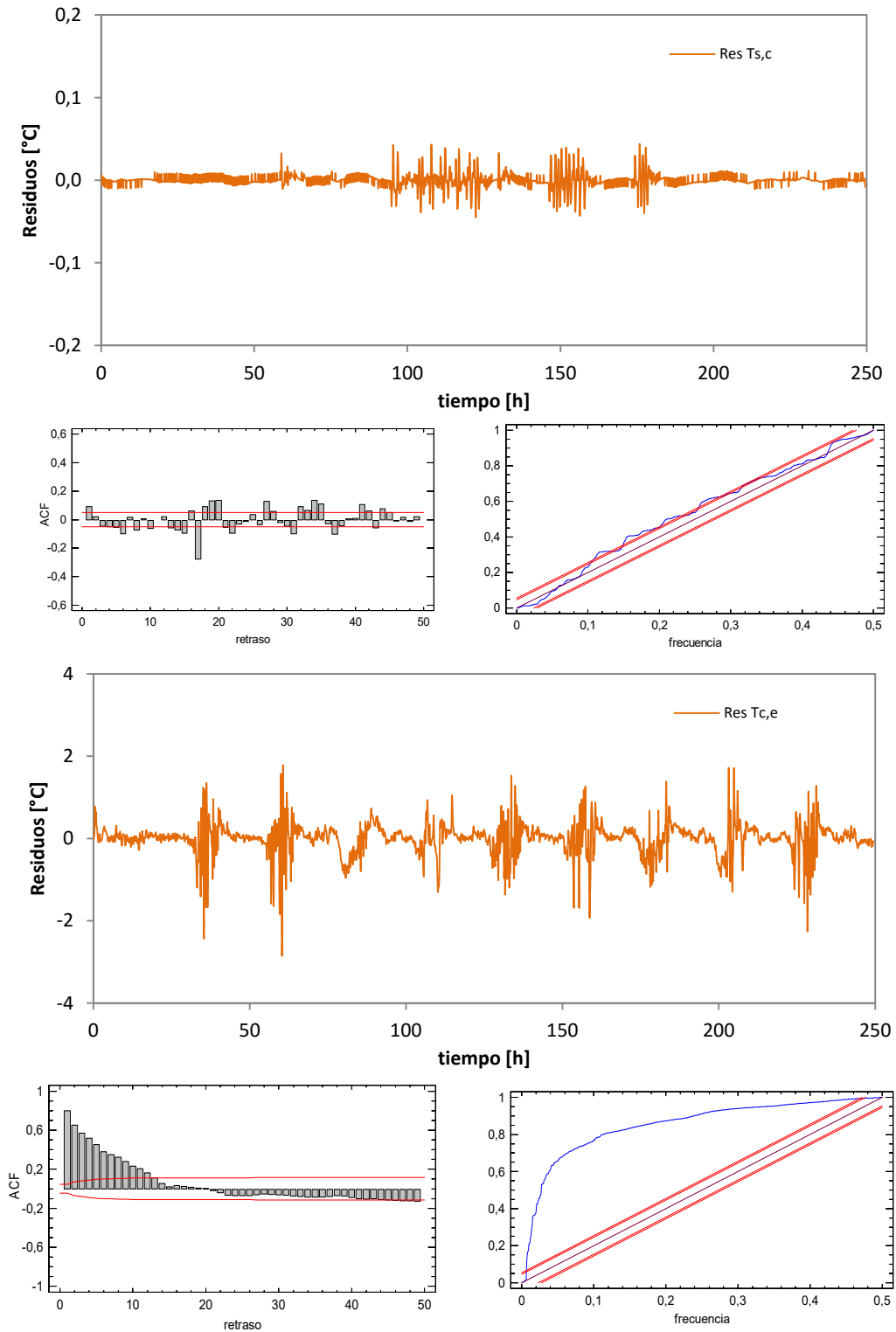


Figura A.85 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación ROLBS

Una vez estudiadas todas las rutinas, se analizan los resultados obtenidos para la conductancia, H , y la capacidad térmica de cada una de las ramas del modelo, que a su vez representan la zona central del muro de calibración, donde se producen condiciones de flujo unidimensional, y para la zona de borde, donde el flujo es bidimensional. También se analiza el comportamiento de la superficie exterior del muro de calibración frente a las condiciones ambientales mediante los parámetros de apertura solar, A_{Gv} , y coeficiente de convección exterior, H_e . En la Tabla A.72 se muestra dicho resumen de resultados totales.

	centro		borde		A_{Gv} [-]	H_{ce} [MJ/K]
	H [W/K]	C [W/m ² K]	H [MJ/K]	C [MJ/m ² K]		
PULSO	0.215	0.064	0.625	0.266	0.321	19.545
PRBS	0.196	0.084	0.648	0.285	0.265	22.986
ROLBS	0.224	0.063	0.633	0.245	0.298	21.098
medio	0.212	0.070	0.635	0.265	0.295	21.210
σ	0.014	0.012	0.012	0.020	0.028	1.723
ref	0.205	0.076	0.605	0.270		
Dif [%]	3.1	-8.0	4.9	-1.8		

Tabla A.72 – Resultados finales del estudio de caracterización del muro de calibración

Anexo B

ENSAYO IQ-Test





B.1 Datos experimentales

El estudio de trazabilidad *IQ-Test* está configurado por el ensayo de dos componentes, el primero formado por un muro opaco con la zona central desmontable y que se sustituya por una ventana de referencia en el segundo ensayo. A su vez, en este estudio se realizan dos ensayos por muestra, el primero con el componente situado a ras del interior del portamuestras y el segundo con la muestra a ras del exterior. Ambas configuraciones tienen aspectos positivos y negativos, respecto a efectos de puente térmico y respecto al sombreado del componente. Esta duplicidad del estudio permite caracterizar dichos efectos y seleccionar la ubicación óptima de las probetas en el desarrollo de los ensayos posteriores. A continuación se muestran los datos de ensayo que no se recogen en la Memoria debido a su extensión.

B.1.1 Primer componente

En los siguientes apartados se recogen los resultados de la verificación de infiltraciones al inicio y fin de los dos ensayos del muro opaco y los datos de flujos de envolvente en la sala de ensayos y la temperatura de las diferentes capas de la probeta para el muro opaco.

B.1.1.1 Ensayo de infiltraciones

En la Tabla B.1 se indican los valores de renovación de aire que se dan en la sala de ensayos debido a infiltraciones para el componente opaco durante los dos periodos de ensayo que se le aplican. En la Figura B.1 y Figura B.2 se muestran los datos de la prueba.

	m_a [ren/h]	
	INICIO	FIN
OPACO-1	0.090	0.134
OPACO-2	0.156	0.224

Tabla B.1 – Resultado de la prueba de infiltraciones para el inicio y fin de los dos ensayos realizados al muro opaco

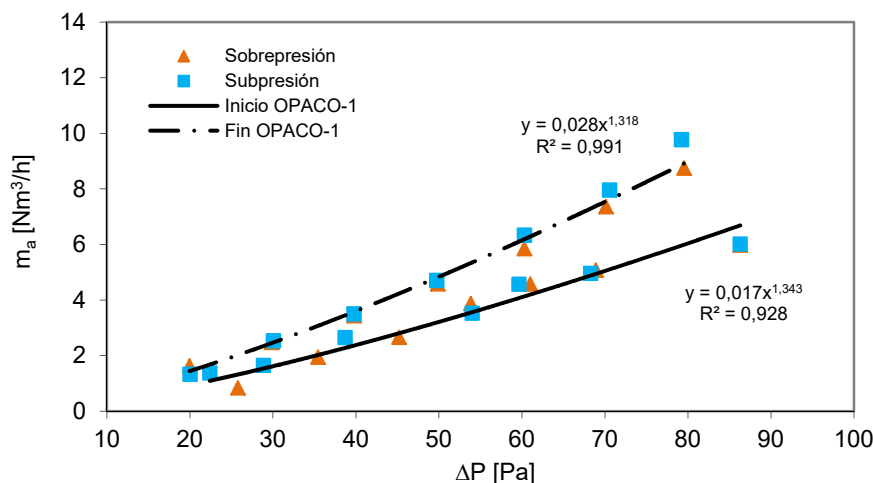


Figura B.1 – Medida de las infiltraciones para el primer ensayo del muro opaco

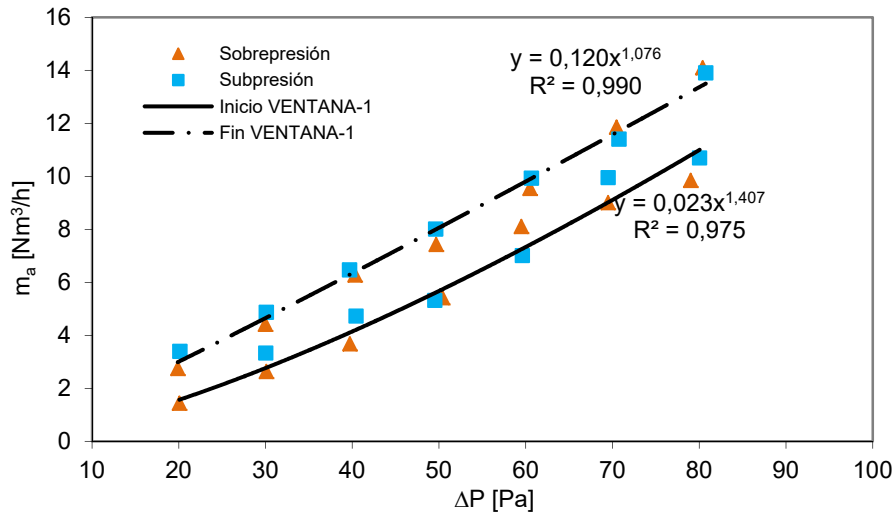


Figura B.2 – Medida de las infiltraciones para el segundo ensayo del muro opaco

Se realiza una prueba previa al inicio del ensayo, de forma que se aplican medidas de sellado hasta que se obtienen tasas aceptables de infiltraciones. Y una vez finalizado, antes de acceder a la sala de ensayos, se realiza de nuevo la prueba de infiltraciones. Repasando los resultados, se puede observar que la colocación de la probeta a ras del exterior en el portamuestras complica el sellado, ya que se obtienen valores más altos de infiltraciones, incluso en el inicio del ensayo.

B.1.1.2 Flujos y temperaturas

A continuación se muestran las medidas de flujo de calor en la envolvente durante el primer ensayo del muro opaco. Verificar la correcta medida de los grupos de *tiles* es fundamental para obtener resultados fiables durante el proceso de identificación de parámetros.

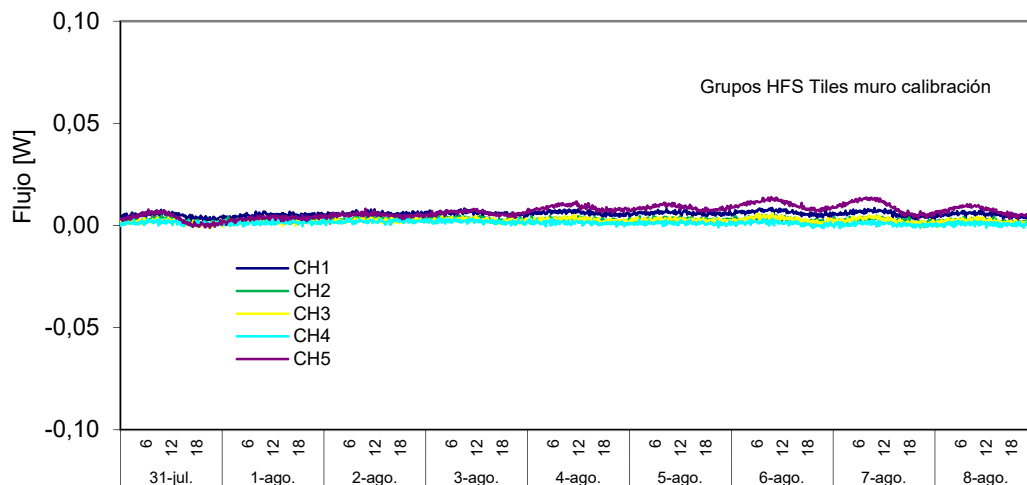


Figura B.3 –Ruido de medida del flujo registrado por las tiles durante el primer ensayo del muro opaco

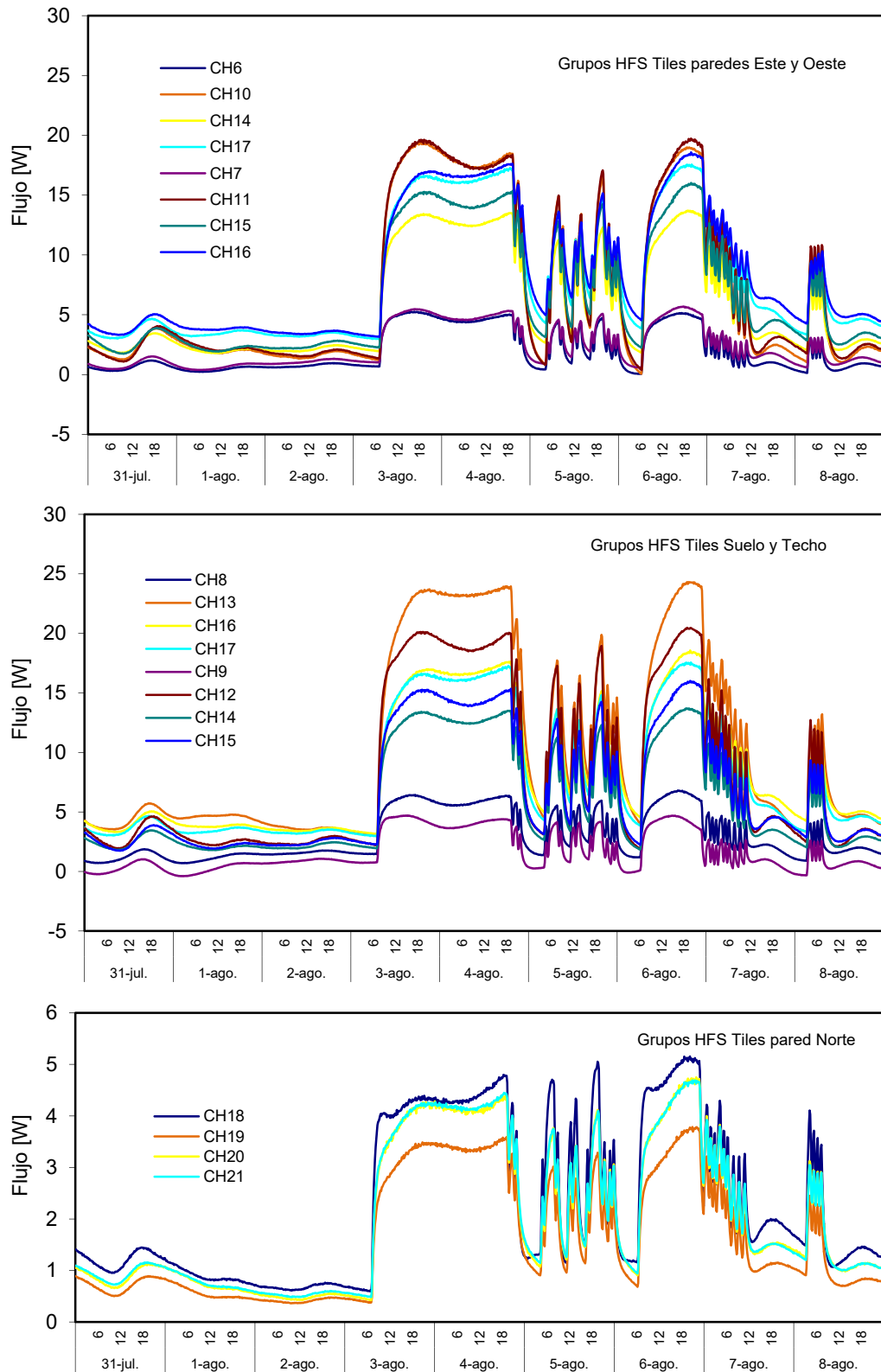


Figura B.4 – Flujos de calor registrados por cada grupo de HFS Tiles durante el primer ensayo del muro opaco

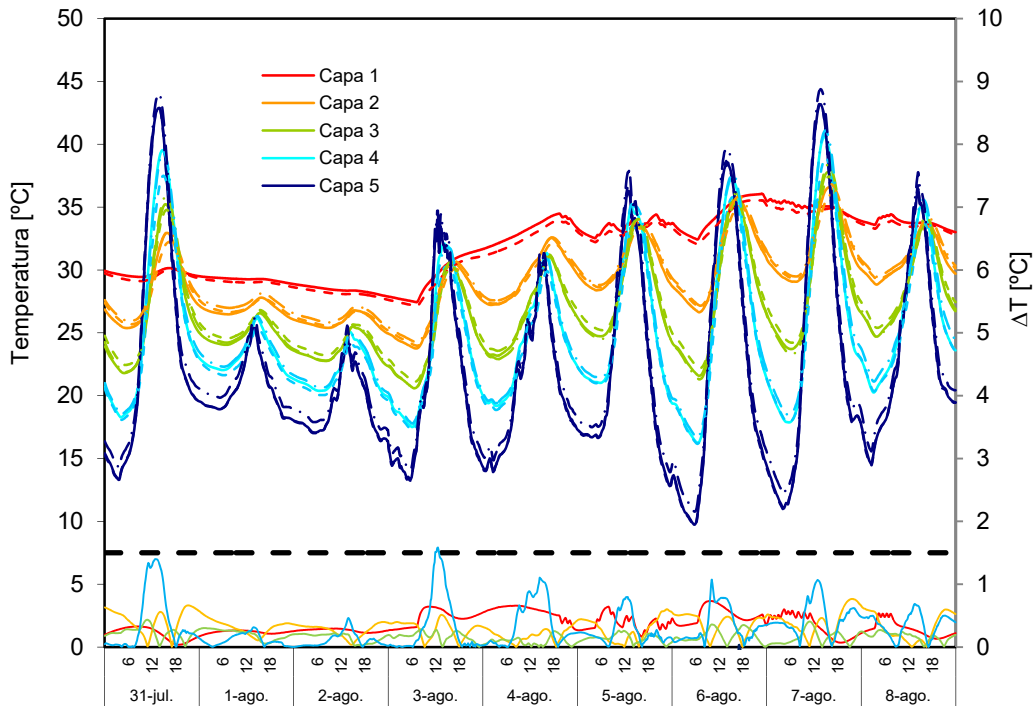


Figura B.5-Evolución de los perfiles de temperatura a lo largo del espesor del muro opaco, para la zona central, lateral y esquina inferior en el primer ensayo

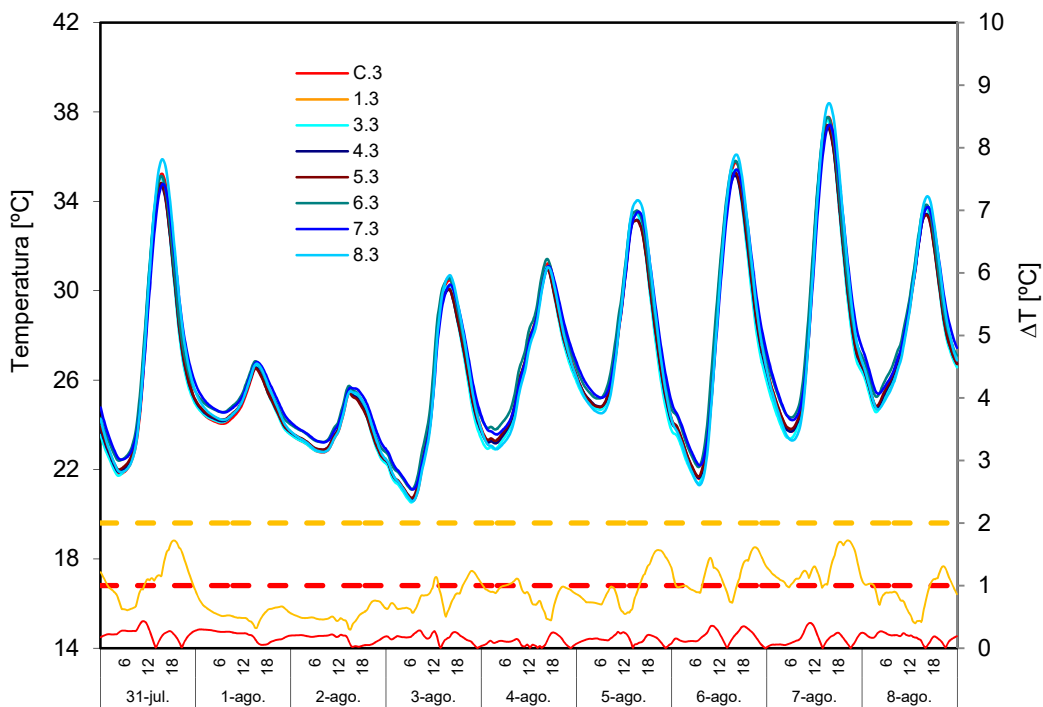


Figura B.6-Evolución de las temperaturas en el plano central del muro opaco para el primer ensayo

En la Figura B.3 se muestra el ruido de medida de las *tiles* junto la cadena de medida del sistema de adquisición. Esta señal de ruido se obtiene puentando los terminales de los grupos correspondientes al muro de calibración que están libres durante el desarrollo de los ensayos normales. Se puede ver que el ruido de medida es muy pequeño, dos

ordenes de magnitud inferior a la señal de flujo media medida. Por lo tanto, la precisión de medida del flujo es elevada. En la Figura B.4 se recogen las señales del total de grupos de *tiles* de la envolvente. Se puede ver que se cumple el chequeo que se indica en la página 155 de la memoria. A continuación se muestran las temperaturas correspondientes a la propia muestra de muro opaco. En la Figura B.5 se muestran los perfiles de temperatura para cada capa de la muestra y en cada uno de los ejes de medida de la muestra que se corresponden con el eje central, la zona de borde y la zona de esquina. En la Figura B.6 se muestran las temperaturas en la capa central de la probeta. En la Figura B.7 y en la Figura B.8 se muestran los flujos puntuales registrados mediante los fluxímetros instalados en el interior y en la superficie del muro opaco.

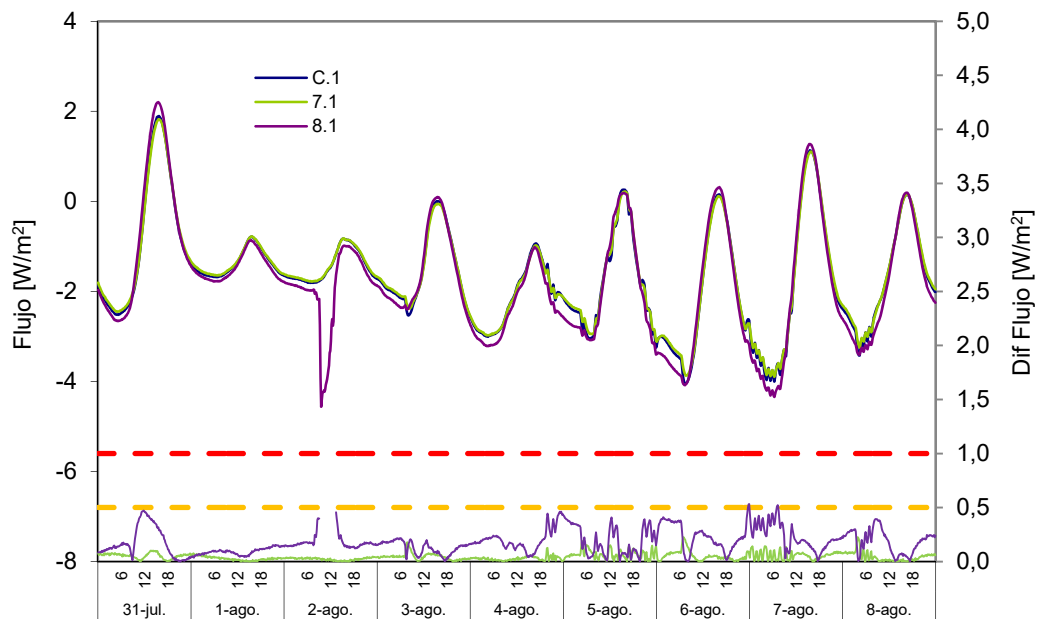


Figura B.7 –Señal de los fluxímetros integrados en la cara interior del muro opaco durante el primer ensayo

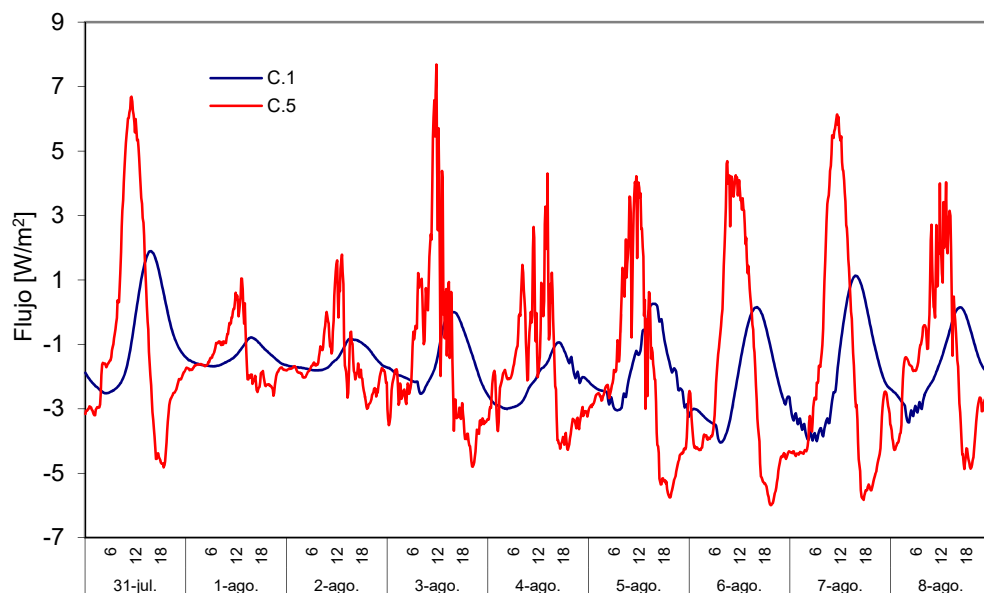


Figura B.8 –Flujos en la zona central del muro opaco en la cara interior y exterior durante el primer ensayo

B.1.2 Segundo componente

En los siguientes apartados se recogen los resultados de la verificación de infiltraciones al inicio y fin de los dos ensayos del muro opaco y los datos de flujos de envolvente en la sala de ensayos y la temperatura de las diferentes capas de la probeta para el muro con la ventana de referencia.

B.1.2.1 Ensayo de infiltraciones

En la Tabla B.2 se indican los valores de renovación de aire que se dan en la sala de ensayos debido a infiltraciones para el componente con la ventana durante los dos periodos de ensayo que se le aplican.

	m_a [ren/h]	
	INICIO	FIN
VENTANA-1	0.139	0.145
VENTANA-2	0.136	0.171

Tabla B.2 – Resultado prueba de infiltraciones para el inicio y fin de los dos ensayos realizados al muro con la ventana

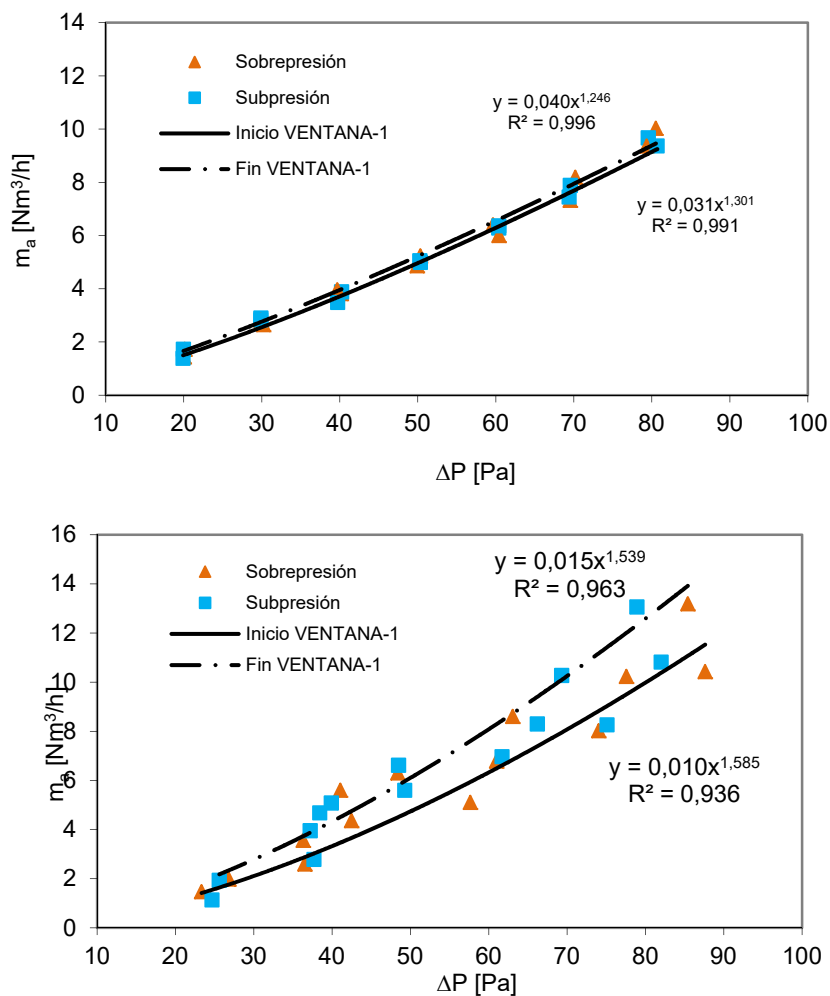


Figura B.9 – Medida de las infiltraciones para el muro con ventana

En la Figura B.9 se muestran los datos de la prueba, la gráfica superior corresponde al primer ensayo y la gráfica inferior al segundo. En el caso del segundo componente se puede ver que las infiltraciones son algo más altas que para el caso del muro opaco. Es de esperar ya que existen más juntas, pero aún así, los valores son reducidos y se mantienen entre el inicio y fin del periodo de estudio.

B.1.2.2 Flujos y temperaturas

A continuación se muestran las medidas de flujo de calor en la envolvente durante el primer ensayo del muro con la ventana.

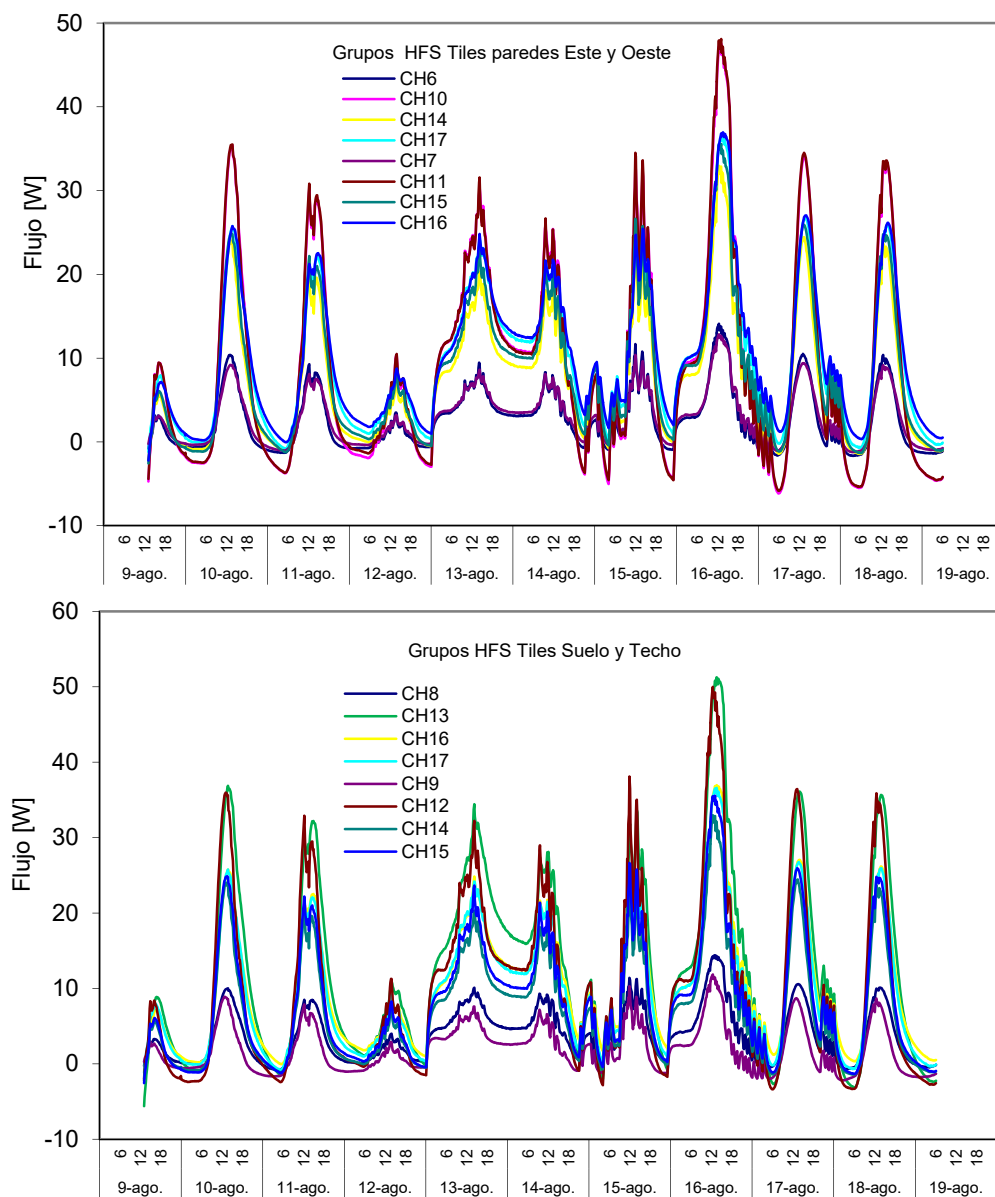


Figura B.10 – Flujos de calor registrados por cada grupo de HFS Tiles durante el primer ensayo del muro con ventana

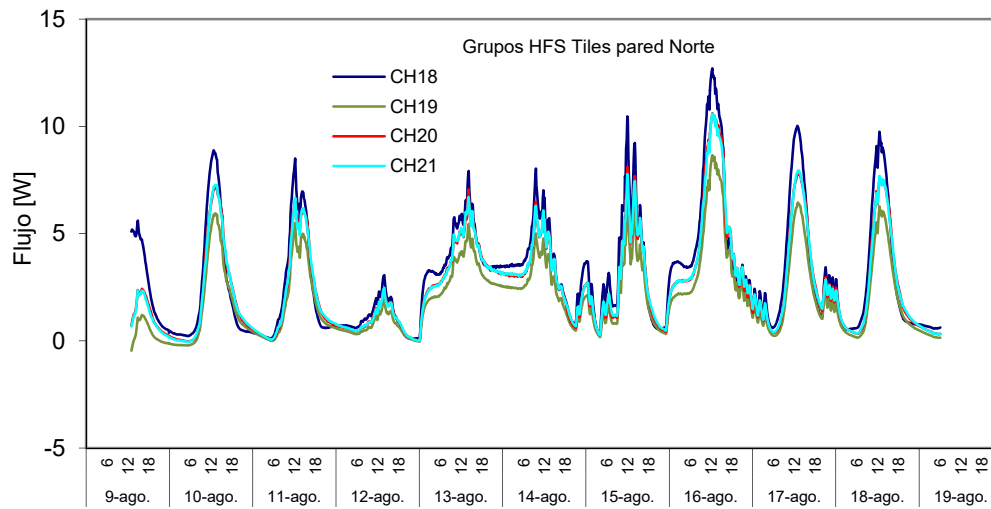


Figura B.11 – Flujos de calor registrados por cada grupo de HFS Tiles durante el primer ensayo del muro con ventana

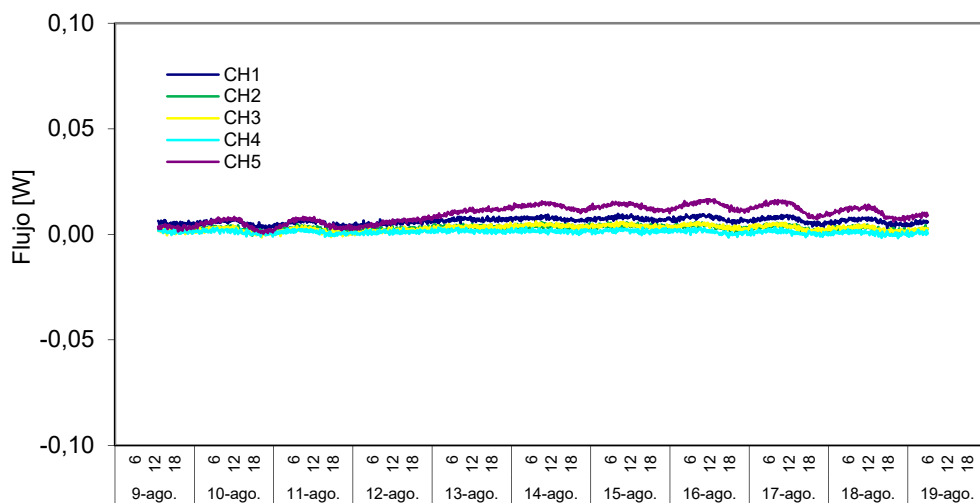


Figura B.12 –Ruido de medida del flujo registrado por las tiles durante el primer ensayo del muro con ventana

En la Figura B10 y en la Figura B.11 se puede ver que los flujos de la envolvente se ven afectados por la ganancia solar que atraviesa la ventana de la probeta, generando un aumento claro del flujo de calor saliente en la sala de ensayos que no está asociado a la rutina de calentamiento. Pero en todos los casos, se mantienen los criterios de comportamiento para grupos equivalentes, por lo que dicha ganancia solar no está afectando a la medida del flujo, gracias a la cortina de apantallamiento que se coloca tras la ventana. En la Figura B.12 se puede ver cómo el ruido de la señal de flujo sigue siendo muy pequeño, aunque sí se puede apreciar el efecto de la radiación solar.

A continuación se muestran las temperaturas correspondientes a la propia muestra de muro con ventana. En la Figura B.13 se recogen las temperatura media registrada por las sondas de aire de la sala de ensayos respecto a la registrada por la sonda de cuerpo negro. Se puede ver que la diferencia entre ambas es siempre inferior a 0,5 °C por lo que no existe un intercambio radiativo representativo dentro de la sala de ensayos, de forma que se puede considerar que la cortina situada tras la ventana del segundo

componente está realizando su función adecuadamente y la medida del flujo de la envolvente es correcta ya que las *tilas* no se ven afectadas por radiación directa. En este primer ensayo del segundo componente no se coloca sonda de temperatura en la cámara de aire entre la ventana y la cortina de protección. Pero analizando los datos, se ve que es interesante disponer de este dato para mejorar el modelo y verificar la eficiencia en la ganancia solar dentro de la sala de ensayos, por lo que se incluye en el conjunto de instrumentación propia de la muestra para el segundo ensayo.

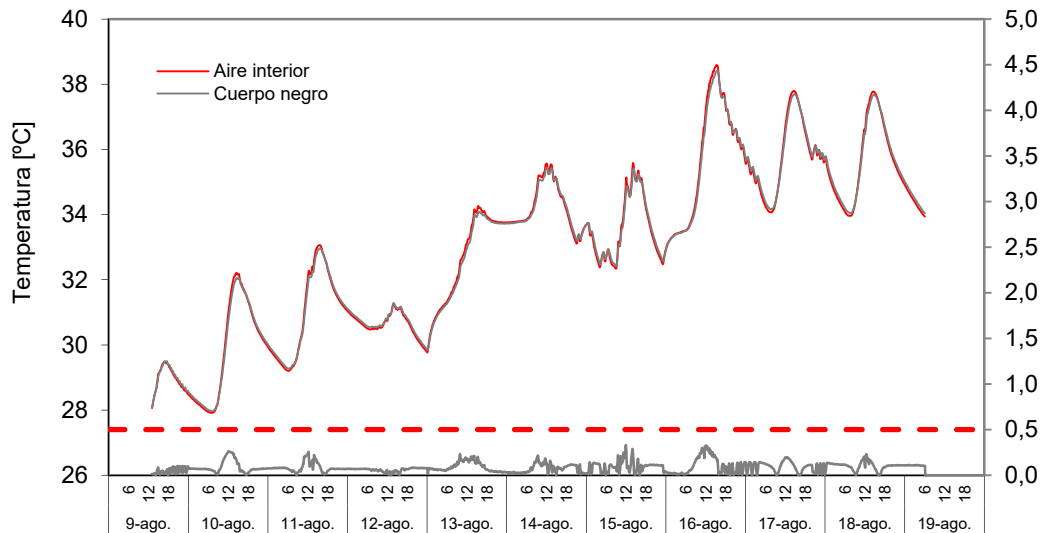


Figura B.13 –Ruido de medida del flujo registrado por las *tilas* durante el primer ensayo del muro con ventana

En la Figura B.14 se muestran las temperaturas registradas por las sondas de superficie instaladas en ambos vidrios de la ventana. En la Figura B.15 se determina la temperatura media del aire de la cámara y el salto de temperaturas entre vidrios, estos dos parámetros determinan el movimiento de convección dentro de dicha cámara y participan de forma determinante en el valor real de transmitancia del componente de ventana, cómo se puede ver en el apartado correspondiente de la memoria.

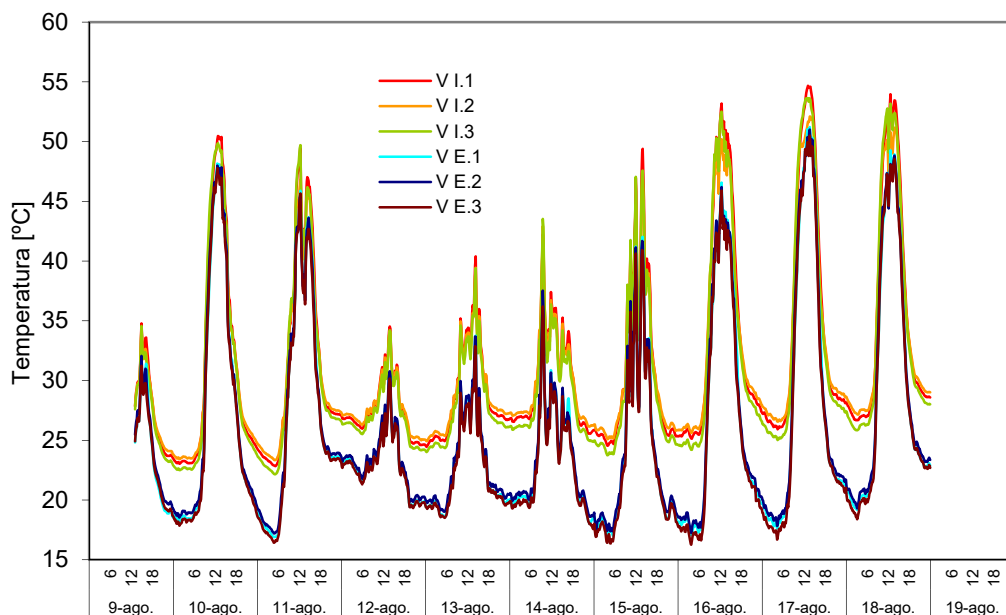


Figura B.14 –Temperaturas en los vidrios de la ventana durante el primer periodo de ensayo

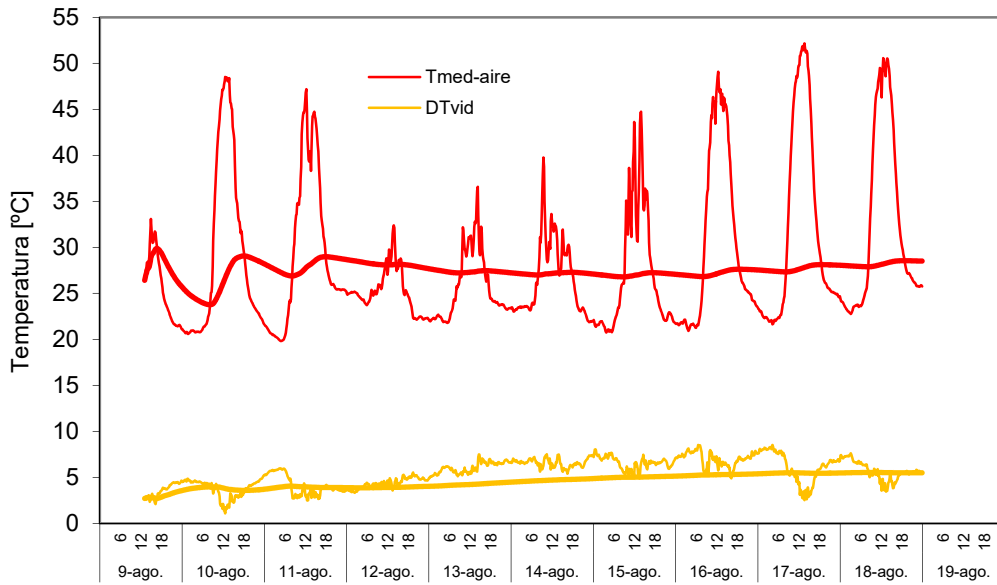


Figura B.15 –Temperaturas media aire cámara y salto de temperatura entre vidrios durante el primer ensayo

En la Figura B.16 se pueden ver los perfiles de temperatura en el anillo perimetral de la muestra para el punto central del lado inferior y para la zona de esquina. Se puede observar como las mayores diferencias entre los dos ejes se producen en las superficies más exteriores. Durante este ensayo la sonda de temperaturas de la zona de esquina en la primera capa dio error de lectura, problema que se repara durante el segundo ensayo.

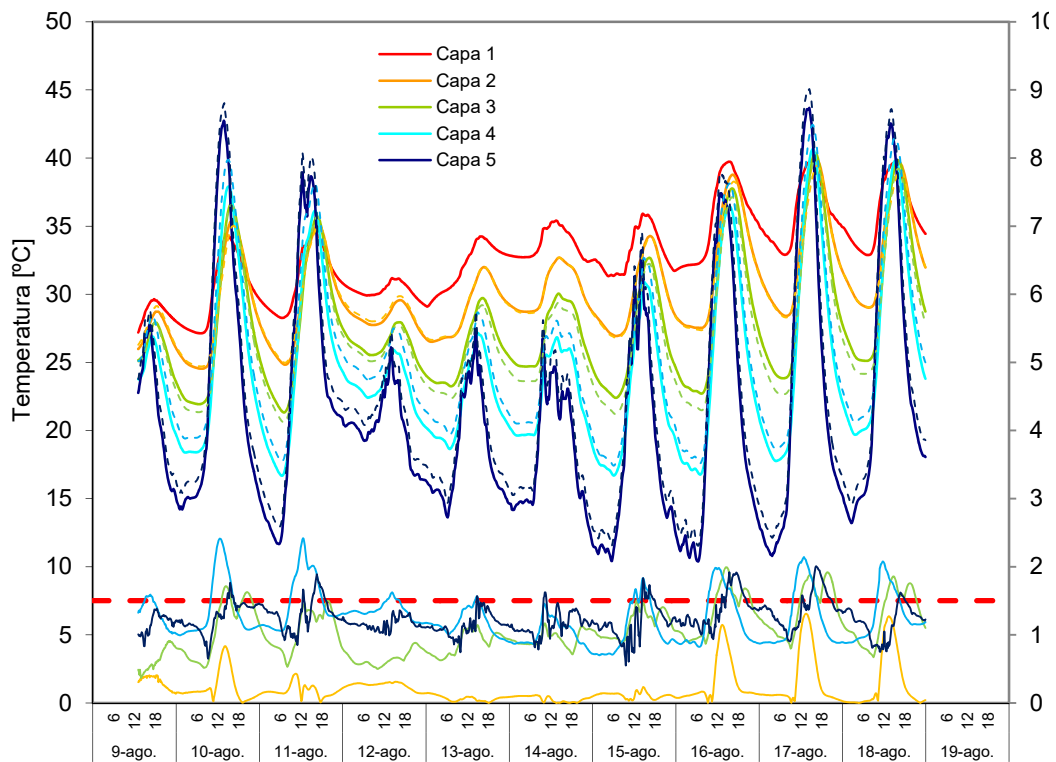


Figura B.16 –Perfiles de temperatura en el anillo perimetral para la zona central y la zona de esquina

Otra forma de cuatificar los efectos de borde es analizar la homogeneidad de temperaturas en la capa central, en la que se dispone de todo el mapa de sondas. Se puede observar que las diferencias medias son inferiores a 1,5°C y este valor no se supera salvo en periodos puntuales y con un margen reducido.

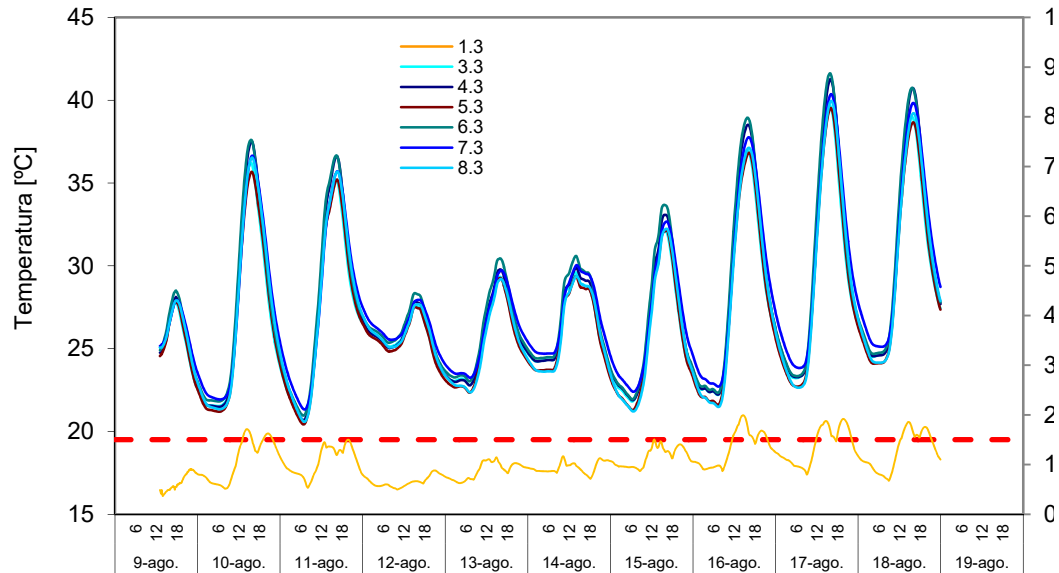


Figura B.17 –Campo temperaturas en la capa central del anillo perimetral de la segunda muestra del IQ-Test

B.2 Modelos matemáticos

Una vez validados los datos experimentales se pasa a trabajar en los modelos de indentificación de parámetros, a continuación se muestran los resultados completos del conjunto de modelos que se han empleado para el análisis de las propiedades térmicas de los dos componentes del ensayo IQ-Test.

B.2.2 Modelos del primer componente

En el proceso de trabajo del ensayo IQ-Test, primero se determinan las propiedades en la zona central del muro opaco y posteriormente se determinan los valores globales de toda la probeta. De forma que se puede restar la conductancia de la zona central al valor completo y calcular la conductancia del anillo perimetral que sirve como base para el estudio del segundo componente.

B.2.2.1 Modelo unidimensional

Para el análisis de la zona central con condiciones de flujo unidimensional se emplea un modelo de segundo orden como el que se muestra en la Figura B.18. Las ecuaciones que lo definen son idénticas a las ya espuestas en [A.17] y [A.18] para los modelos

unidimensionales del muro de calibración. En este caso se emplea un modelo de segundo orden ya que si el muro de calibración, que presenta el doble de espesor que el muro opaco del primer componente del IQ-Test, se representa por un modelo de tercer orden, se considera que con un orden inferior se obtienen resultados fiables, reduciendo el número de parámetros en la identificación.

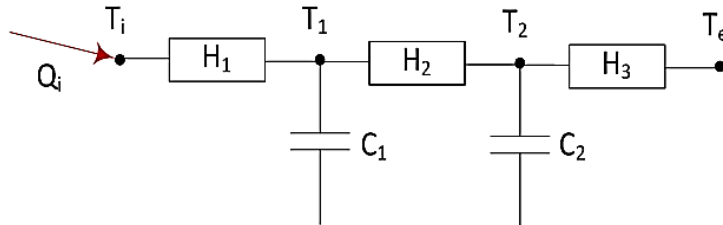


Figura B.18– Modelo segundo orden para la determinación transmitancia del perfil central, U_A , del muro opaco

A continuación se muestran los resultados del proceso de identificación para cada una de los dos periodos de ensayo realizados.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	0.1	1	1000	3.28E-01	2.18E-02	93.861	0	0
H_2	0.1	1	1000	3.38E-01	7.95E-03	11.154	0	-0.0112
C_1	0.5	5	50	4.03E+00	1.55E+00	72.277	0.005	0.0002
C_2	0.5	5	50	9.15E+00	1.51E-01	86.984	0	0
H_3	0.1	1	1000	6.18E+01	1.71E+00	53.698	0.0033	0

Tabla B.3 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para el primer ensayo en la zona centra muro opaco

	H_1	H_2	C_1	C_2	H_3
H_1	1				
H_2	0.432	1			
C_1	0.091	0.343	1		
C_2	0.196	0.333	0.326	1	
H_3	0.161	0.058	0.401	0.094	1

Tabla B.4 – Coeficientes correlación para el primer ensayo en la zona centra muro opaco

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]
T_i	0.2	K	0.001	0.120
T_e	0.5	K	0.002	0.200
Q_i	0.4	W/m ²	0.004	0.480

Tabla B.5 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.1	1	1000	2.89E-01	3.84E-03	0.902	0.185	0.880
H ₂	0.1	1	1000	4.39E-01	8.34E-03	0.046	0.387	0.963
C ₁	0.5	5	50	9.47E+00	3.03E-01	0.024	0.368	0.745
C ₂	0.5	5	50	4.01E+00	8.06E-01	0.788	0.636	0.332
H ₃	0.1	1	1000	2.63E+00	2.22E-02	0.903	0.499	0.559

Tabla B.6 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para el segundo ensayo zona centra muro opaco

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	0.054	1			
C ₁	0.243	0.090	1		
C ₂	0.128	0.421	0.203	1	
H ₃	0.206	0.413	0.153	0.319	1

Tabla B.7 – Coeficientes correlación para el segundo ensayo en la zona centra muro opaco

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]
T _i	0.2	K	0.0012	0.113
T _e	0.5	K	0.0012	0.189
Q _i	0.4	W/m ²	0.0036	0.454

Tabla B.8 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación

En la Tabla B.9 se recogen los valores finales de resistencia y capacidad térmica que se obtienen de los resultados de los modelos de identificación de parámetros. Hay que recordar que en el modelo de identificación se obtienen conductancias y los valores de capacidad térmica están en unidades de C_i [W_{10min}]. Estas son unidades raras de capacidad, pero se obtienen así debido a que el flujo está en [W] y el intervalo de tiempo para el cálculo es de 10 [min].

	R _A [m ² K/W]	C _A [KJ/m ² K]	Residuo [W]
1º ensayo	6,027	7,908	0,17
2º ensayo	6,117	8,090	0,15

Tabla B.9 – Resultados del modelo para el perfil central

Con estos datos y aplicando la propagación de errores se obtienen los resultados finales para la transmitancia del perfil central indicados en la Tabla B.10. Estos resultados son lo que se emplean para el primer estudio del ensayo de interlaboratorios.

	U_A [W/m ² K]	e_{UA} [%]
1º ensayo	0,166	5,3
2º ensayo	0,164	2,9

Tabla B.10 – Resultados finales transmitancia unidimensional U_A para el perfil central del muro opaco

B.2.2.2 Modelo completo

Una vez determinada la transmitancia del eje central, el siguiente dato del interlaboratorios es el cálculo de la transmitancia completa del componente opaco empleando un modelo a escala de celda. El modelo empleado se muestra en la Figura B.19. Las ecuaciones del mismo se indican en [B.1] y [B.2].

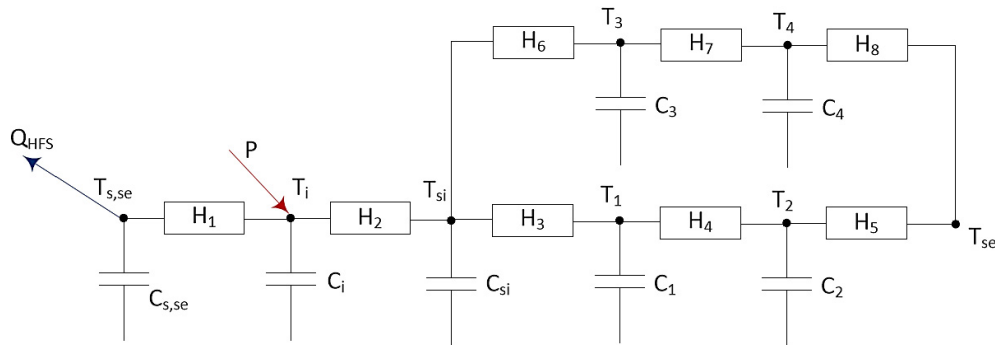


Figura B.19 – Modelo del muro opaco completo con dos ramas para representar el efecto de borde

$$\begin{bmatrix} dT_{s,se} \\ dT_i \\ dT_{si} \\ dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_1}{C_{s,se}} & \frac{H_1}{C_{s,se}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_1}{C_i} & \frac{-(H_1 + H_2)}{C_i} & \frac{H_2}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_{si}} & \frac{-(H_2 + H_3 + H_6)}{C_{si}} & \frac{H_3}{C_{si}} & 0 & \frac{H_6}{C_{si}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_1} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_1} & \frac{H_4}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_2} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_6}{C_3} & 0 & 0 & \frac{-(H_6 + H_7)}{C_3} & \frac{H_7}{C_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_7}{C_4} & \frac{-(H_7 + H_8)}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_{si} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{s,se}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_5}{C_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_8}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_{se} \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt \quad [B.1]$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,se}^m \\ T_i^m \\ T_{si}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_{si} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_{se} \end{bmatrix} + [e] \quad [B.2]$$

En este caso particular se podrían emplear las temperaturas interiores registradas en el componente de muro opaco como funciones de entrada al modelo, de forma que se mejoraría en gran medida la precisión de los resultados. Sin embargo, es complejo que se pueda disponer de esta información en otros ensayos, por lo tanto, se debe determinar las propiedades del componente a través de los datos propios de la celda. A continuación se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H₁	100	300	1000	3.56E+02	4.02E+00	85.7383	0.00016	0.00024
C_{s,se}	500	1000	1500	9.02E+02	2.81E+01	36.2098	0.00012	0.00042
C_i	1	50	200	3.75E+01	2.64E+00	24.7917	0.00037	-0.00035
H₂	10	50	200	6.87E+01	2.31E+00	23.3196	-0.00046	0.00041
C_{si}	1	50	100	4.83E+01	2.67E+01	73.9725	-0.00028	-0.00026
H₃	0.6	1	1000	1.07E+00	2.26E-04	47.3765	-0.00032	0
H₆	0.6	1	1000	2.27E+00	1.35E-01	50.1433	-0.00034	0.00031
C₁	1	250	500	3.80E+01	1.54E+01	96.0384	-0.00015	0
H₄	0.6	1	1000	1.46E+00	4.40E-02	11.8472	-0.00049	-0.00028
C₂	1	250	500	4.02E+01	9.26E+00	31.1362	0.00026	0.00050
H₅	0.6	1	1000	2.20E+01	4.52E-02	98.9031	0	0.00022
C₃	1	250	500	7.42E+01	3.98E+00	2.1728	-0.00029	0.00028
H₇	0.6	1	1000	2.96E+00	8.29E-03	85.7467	-0.00036	-0.00024
C₄	1	250	500	1.28E+02	2.67E+01	84.4039	0	0.00042
H₈	0.6	1	1000	3.01E+01	1.26E-01	80.3147	0.00013	0

Tabla B.11 – Resultados identificación parámetros para 1º ensayo en el modelo completo de muro opaco

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C _{si}	H ₃	H ₆	C ₁	H ₄	C ₂	H ₅	C ₃	H ₇	C ₄	H ₈
H₁	1														
C_{s,se}	0.6	1													
C_i	0.6	0.1	1												
H₂	0.2	0.4	0.1	1											
C_{si}	0.4	0.2	0.2	0.1	1										
H₃	0.6	0.4	0.4	0.6	0.2	1									
H₆	0.6	0.3	0.0	0.5	0.6	0.6	1								
C₁	0.6	0.6	0.3	0.5	0.4	0.1	0.5	1							
H₄	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.5	0.3	0.1	1						
C₂	0.5	0.1	0.1	0.4	0.3	0.0	0.1	0.5	0.4	1					
H₅	0.2	0.1	0.4	0.4	0.2	0.0	0.6	0.0	0.3	0.1	1				
C₃	0.2	0.1	0.2	0.4	0.0	0.1	0.5	0.5	0.4	0.1	0.5	1			
H₇	0.5	0.5	0.5	0.1	0.5	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1		
C₄	0.2	0.1	0.6	0.1	0.4	0.5	0.2	0.1	0.5	0.1	0.3	0.1	0.3	1	
H₈	0.4	0.0	0.4	0.4	0.2	0.5	0.0	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	1

Tabla B.12 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro opaco para 1º ensayo

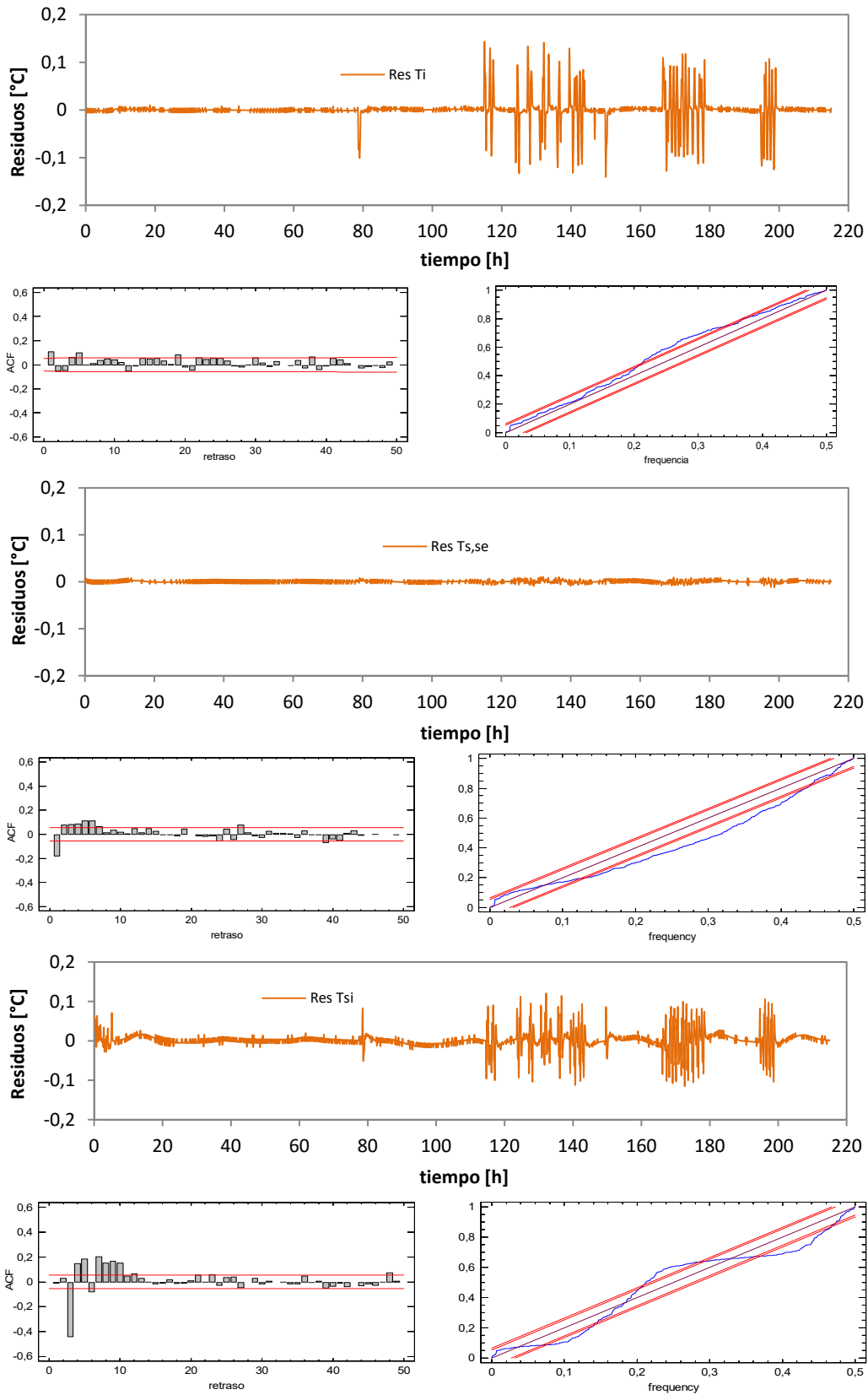


Figura B.20 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro opaco

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	3.47E+02	7.93E+00	16.8653	0.00077	0.00042
C _{s,se}	500	1000	1500	9.24E+02	1.39E+01	11.6812	0.00067	0.00059
C _i	1	50	200	4.88E+01	2.57E+00	37.5728	0.00073	0.00070
H ₂	10	50	200	6.47E+01	3.49E-01	75.2596	0.00079	0.00087
C _{si}	1	50	100	1.03E+02	9.40E+00	24.2198	0.00095	0.00041
H ₃	0.6	1	1000	1.74E+00	6.64E-02	8.6567	0.00020	0
H ₆	0.6	1	1000	2.86E+00	2.69E-03	77.0433	0.00041	0.00029
C ₁	1	250	500	3.11E+01	2.82E+00	94.8852	0.00052	0
H ₄	0.6	1	1000	1.37E+00	9.31E-03	75.9915	0.00018	0.00044
C ₂	1	250	500	5.25E+01	7.96E+00	28.7426	0.00098	0.00085
H ₅	0.6	1	1000	2.16E+02	2.53E+01	19.9403	0	0.00017
C ₃	1	250	500	5.65E+01	4.24E+00	5.3987	0.00068	0.00096
H ₇	0.6	1	1000	1.97E+00	6.51E-02	3.7502	0.00019	0.00045
C ₄	1	250	500	6.27E+01	5.29E+00	37.0835	0	0.00024
H ₈	0.6	1	1000	2.61E+00	2.25E-01	1.9595	0.00004	0

Tabla B.13 – Resultados identificación parámetros para 2º ensayo en el modelo completo de muro opaco

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C _{si}	H ₃	H ₆	C ₁	H ₄	C ₂	H ₅	C ₃	H ₇	C ₄	H ₈
H ₁	1														
C _{s,se}	0.6	1													
C _i	0.3	0.2	1												
H ₂	0.4	0.1	0.5	1											
C _{si}	0.2	0.4	0.6	0.3	1										
H ₃	0.3	0.5	0.1	0.3	0.0	1									
H ₆	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1	0.5	1								
C ₁	0.6	0.3	0.4	0.5	0.2	0.1	0.2	1							
H ₄	0.2	0.5	0.3	0.2	0.0	0.1	0.5	0.4	1						
C ₂	0.5	0.4	0.6	0.1	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	1					
H ₅	0.1	0.2	0.0	0.3	0.6	0.6	0.1	0.2	0.6	0.3	1				
C ₃	0.4	0.3	0.1	0.0	0.5	0.3	0.5	0.2	0.6	0.4	0.2	1			
H ₇	0.4	0.3	0.4	0.0	0.3	0.1	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.4	1		
C ₄	0.4	0.4	0.6	0.6	0.3	0.1	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.4	1	
H ₈	0.6	0.6	0.1	0.3	0.5	0.6	0.3	0.2	0.4	0.1	0.5	0.5	0.0	0.4	1

Tabla B.14 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro opaco para 2º ensayo

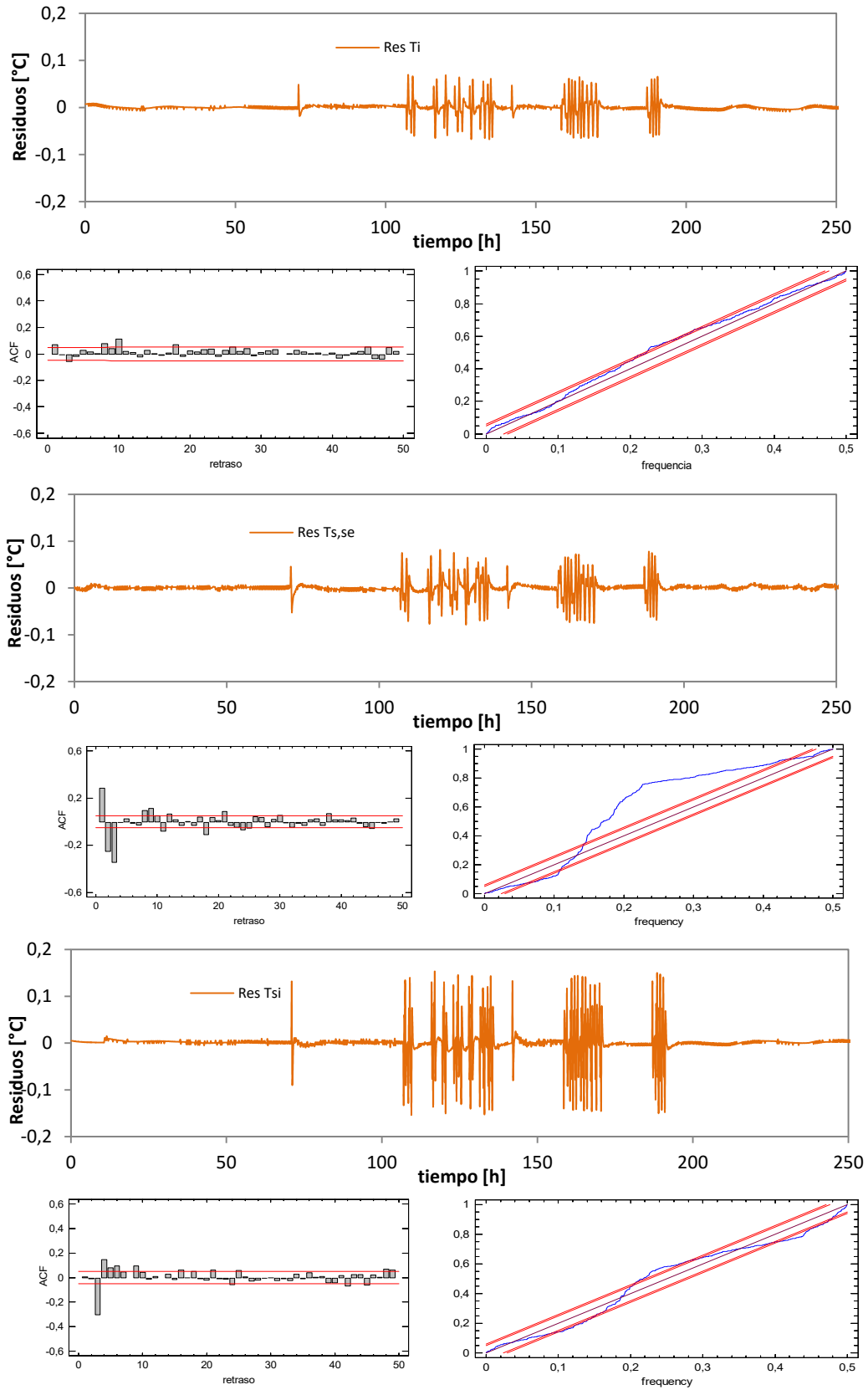


Figura B.21 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro opaco

En base a los resultados obtenidos en los dos modelos de identificación de parámetros se obtienen los valores de propiedades térmicas recogidos en la Tabla B.15.

		RAMA 1	RAMA 2
1º ENSAYO	U [W/K]	0,599	1,231
	C [MJ/K]	0,061	0,136
2º ENSAYO	U [W/K]	0,763	0,806
	C [MJ/K]	0,081	0,102

Tabla B.15 – Valores de conductancias y capacidades térmicas de cada rama del modelo de celda completo para el muro opaco

Con estos datos y aplicando la propagación de incertidumbres, Tabla B.16 y Tabla B.17, del ensayo se obtienen los resultados finales indicados en la Tabla B.18 que corresponden a los valores que se emplean para el estudio de interlaboratorios correspondientes al valor de transmitancia total obtenido de la celda para el muro opaco completo.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]
Q_{HFS}	1	W	0.008	0.005
p_e	0.3	W	0.002	0.001
T_{se}	0.5	K	0.018	0.011

Tabla B.16 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación para el primer ensayo

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]
Q_{HFS}	1.7	W	0.010	0.008
p_e	0.4	W	0.010	0.001
T_{se}	0.5	K	0.025	0.015

Tabla B.17 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación para el segundo ensayo

	U [W/K]	C [MJ/K]	e_U [%]	e_C [%]
1º ensayo	1,830	0,197	2,8	25,8
2º ensayo	1,569	0,183	3,5	13,4

Tabla B.18 – Resultados del valor de transmitancia *U* y capacidad térmica *C* para el muro opaco completo

En cuanto a la muestra de muro opaco, queda por valorar si la ubicación de la probeta en el portamuestras representa una diferencia efectiva en la interacción con la radiación solar incidente debido a sombras. Para ello se amplía el modelo de celda completo a las funciones de excitación correspondientes a las condiciones exteriores registradas por la sonda de temperatura ventilada y por el solarímetro vertical situado sobre la muestra, ver Figura B.22. Las ecuaciones del modelo se muestran en [B.3] y [B.4].

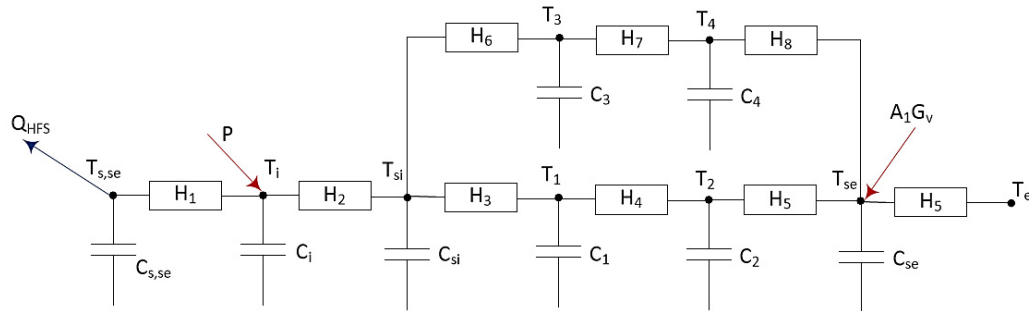


Figura B.22 – Modelo completo del muro opaco con la interacción de la radiación solar y la convección exterior

$$\begin{bmatrix} dT_{s,se} \\ dT_i \\ dT_{si} \\ dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \\ dT_{se} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_1}{C_{s,se}} & \frac{H_1}{C_{s,se}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_1}{C_i} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_{si}} & -(H_2 + H_3 + H_6) & \frac{H_3}{C_{si}} & 0 & \frac{H_6}{C_{si}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_1} & -(H_3 + H_4) & \frac{H_4}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_2} & -(H_4 + H_5) & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_2} \\ 0 & 0 & \frac{H_6}{C_3} & 0 & 0 & -(H_6 + H_7) & \frac{H_7}{C_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_7}{C_4} & -(H_7 + H_8) & \frac{H_8}{C_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_{se}} & 0 & \frac{H_8}{C_{se}} & -(H_5 + H_8 + H_6) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_{si} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_{se} \end{bmatrix} dt \quad [B.3]$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{s,se}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_6}{C_{se}} & \frac{A_1}{C_{se}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt \quad [B.4]$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,se}^m \\ T_i^m \\ T_{si}^m \\ T_1^m \\ T_2^m \\ T_3^m \\ T_4^m \\ T_{se}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_{si} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_{se} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} + [e]$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el proceso de identificación de parámetros para cada uno de los periodos de ensayo correspondientes a las dos configuraciones de montaje de la muestra de muro opaco sobre el sistema de portaprobetas. También se muestra el análisis de ruido blanco de los residuos correspondientes a las funciones objetivo empleadas.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	4.56E+02	1.04E+00	57.0485	0	0.00179
C _{s,se}	500	1000	1500	8.19E+02	5.05E+00	66.0263	0.00468	0.00190
C _i	1	50	200	5.59E+01	4.05E+00	77.0987	0	0
H ₂	10	50	200	5.75E+01	9.02E-01	4.8147	-0.00210	0.00173
C _{si}	1	50	100	8.54E+01	5.03E+00	88.2668	-0.00220	0.00275
H ₃	0.6	1	1000	7.73E-01	5.75E-02	23.9228	-0.00424	0
H ₆	0.6	1	1000	2.41E+00	1.55E-01	48.5600	-0.00048	-0.00323
C ₁	1	250	500	3.09E+01	5.51E+00	86.5588	0	-0.00077
H ₄	0.6	1	1000	1.55E+01	1.21E+00	2.0669	0.00455	-0.00059
C ₂	1	250	500	6.21E+01	9.07E+00	10.1520	0	0
H ₅	0.6	1	1000	1.82E+02	5.77E-01	24.7198	0.00467	-0.00343
C ₃	1	250	500	6.57E+01	2.81E+00	28.6418	-0.00198	-0.00445
H ₇	0.6	1	1000	3.12E+00	1.68E-01	58.5331	-0.00443	0.00386
C ₄	1	250	500	9.50E+01	1.84E+01	46.4829	0.00134	0
H ₈	0.6	1	1000	5.55E+00	1.22E+00	97.8623	0.00187	-0.00188
H _e	10	150	500	1.26E+02	6.18E+00	94.9916	-0.00330	0
A ₁	0.1	3	7	1.95E+00	4.42E-01	37.8222	0.00166	0.00301

Tabla B.19 – Resultados identificación parámetros para 1º ensayo en el modelo completo de muro opaco con las variables de ambiente exterior

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C _{si}	H ₃	H ₆	C ₁	H ₄	C ₂	H ₅	C ₃	H ₇	C ₄	H ₈	H _e	A ₁
H ₁	1																
C _{s,se}	0.1	1															
C _i	0.4	0.3	1														
H ₂	0.7	0.5	0.7	1													
C _{si}	0.8	0.7	0.8	0.2	1												
H ₃	0.1	0.3	0.2	0.5	0.0	1											
H ₆	0.2	0.7	0.3	0.7	0.8	0.6	1										
C ₁	0.4	0.9	0.1	0.1	0.5	0.2	0.7	1									
H ₄	0.3	0.9	0.2	0.7	0.5	0.9	0.3	0.2	1								
C ₂	0.3	0.3	0.2	0.4	0.5	0.9	0.1	0.8	0.1	1							
H ₅	0.3	0.4	0.2	0.0	0.3	0.6	0.4	0.0	0.2	0.3	1						
C ₃	0.1	0.4	0.2	0.7	0.8	0.4	0.6	0.7	0.4	0.1	0.3	1					
H ₇	0.5	0.4	0.1	0.9	0.2	0.2	0.8	0.3	0.2	0.6	0.5	0.8	1				
C ₄	0.2	0.3	0.3	0.0	0.3	0.7	0.4	0.5	0.3	0.5	0.8	0.9	0.3	1			
H ₈	0.1	0.8	0.1	0.6	0.4	0.9	0.3	0.4	0.5	0.3	0.8	0.7	0.5	0.2	1		
H _e	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.1	0.6	0.3	0.4	0.0	0.3	0.2	0.0	0.8	1	
A ₁	0.7	0.3	0.8	0.1	0.6	0.1	0.4	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	0.4	0.1	0.2	0.7	1

Tabla B.20 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo exterior del muro opaco para 1º ensayo

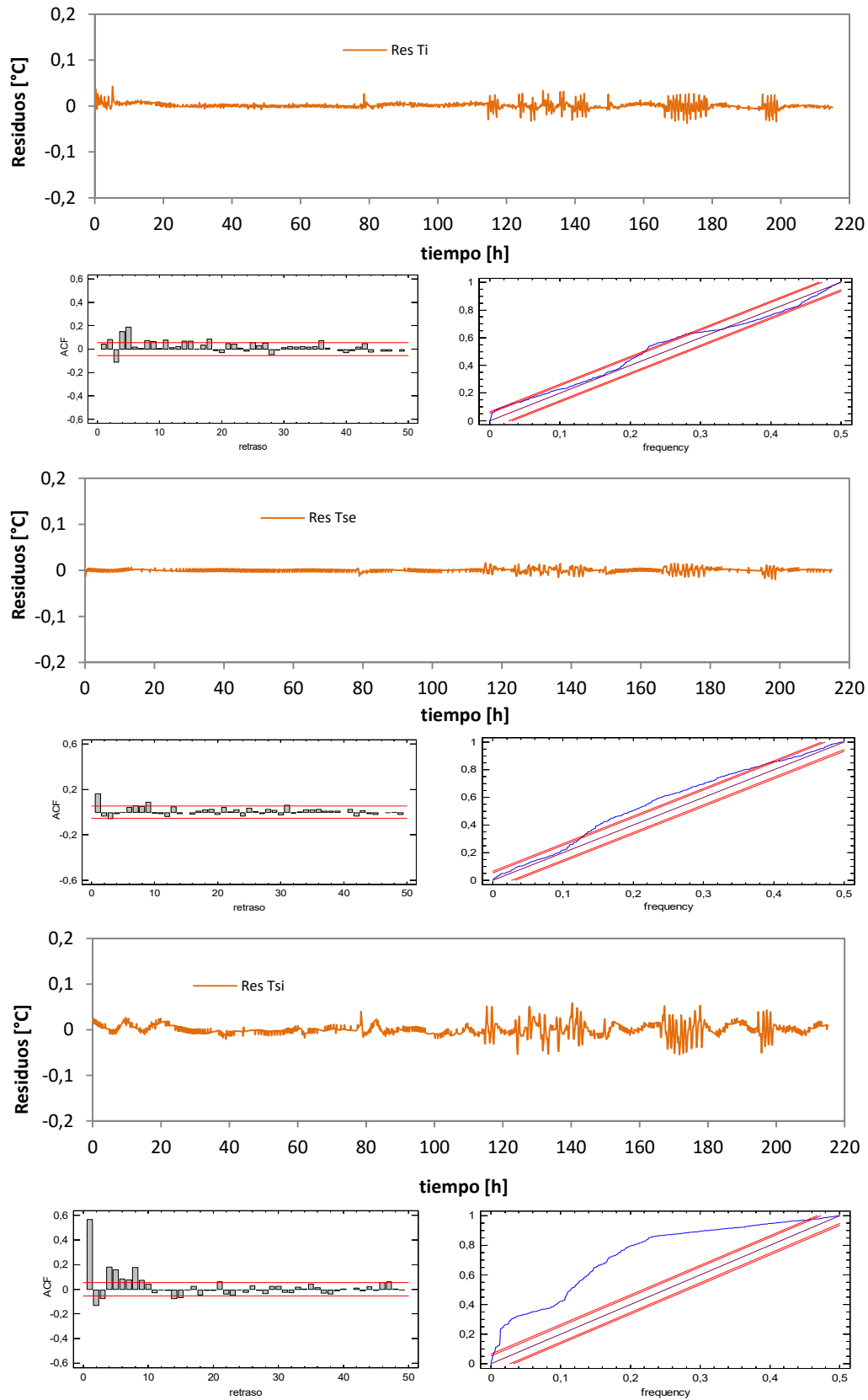


Figura B.23 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro opaco con condiciones exteriores

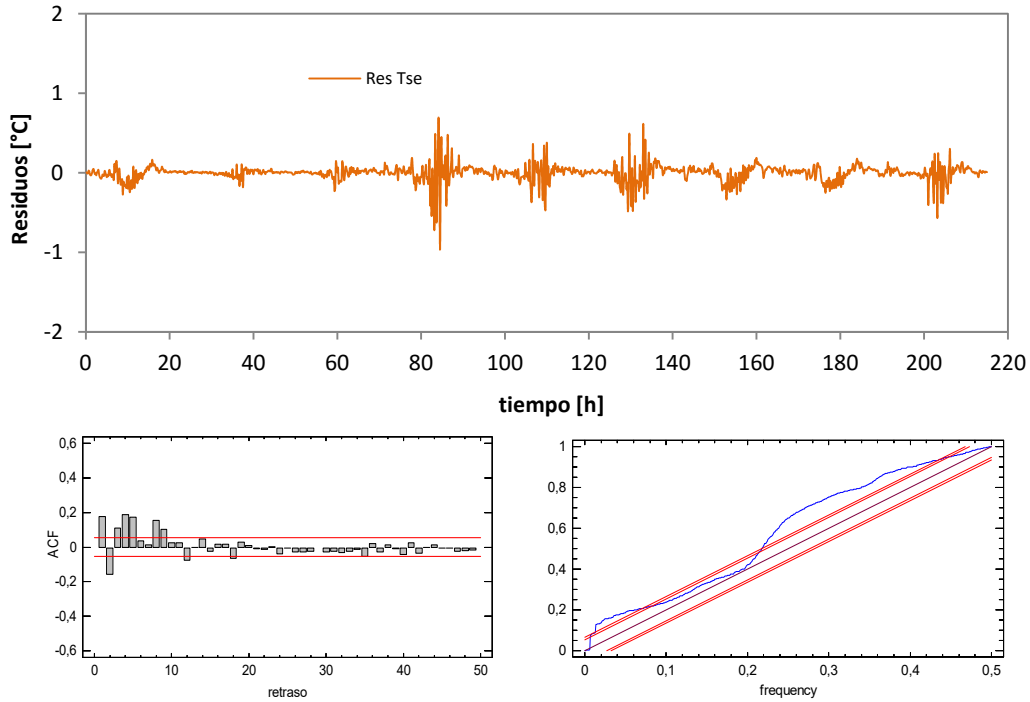


Figura B.24 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro opaco con condiciones exteriores

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	2.90E+02	3.67E+01	87.2623	-0.00149	0.00461
C _{s,se}	500	1000	1500	8.91E+02	8.96E+01	38.6521	0.00352	-0.00361
C ₁	1	50	200	6.54E+01	9.96E+00	83.2884	0	-0.00446
H ₂	10	50	200	6.23E+01	6.99E+00	25.9227	-0.00413	0
C _{si}	1	50	100	8.96E+01	1.43E+01	4.2742	0.00269	0.00411
H ₃	0.6	1	1000	6.44E+00	1.24E-01	8.6494	0.00366	0
H ₆	0.6	1	1000	3.27E+00	4.18E-01	32.4600	0	-0.00228
C ₁	1	250	500	4.22E+01	1.79E+00	78.2838	-0.00394	0.00069
H ₄	0.6	1	1000	1.32E+00	7.90E-02	52.9734	0.00177	0
C ₂	1	250	500	8.25E+01	1.62E+01	91.5313	0	0.00242
H ₅	0.6	1	1000	4.52E+00	1.61E-01	29.7900	0.00360	-0.00441
C ₃	1	250	500	2.86E+01	2.02E+00	52.4876	0	0
H ₇	0.6	1	1000	8.57E-01	1.35E-01	11.9653	-0.00285	0.00361
C ₄	1	250	500	7.04E+01	1.84E+01	84.8449	-0.00463	-0.00230
H ₈	0.6	1	1000	7.45E+01	3.13E+00	58.0730	0	0.00472
H _e	10	150	500	1.01E+02	6.97E+00	22.0486	0	0.00478
A ₁	0.1	3	7	2.04E+00	5.23E-01	1.4947	0.00065	0.00447

Tabla B.21 – Resultados identificación parámetros para 2º ensayo en el modelo completo de muro opaco con las variables de ambiente exterior

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C _{si}	H ₃	H ₆	C ₁	H ₄	C ₂	H ₅	C ₃	H ₇	C ₄	H ₈	H _e	A ₁
H ₁	1																
C _{s,se}	0.7	1															
C _i	0.6	0.5	1														
H ₂	0.2	0.1	0.7	1													
C _{si}	0.3	0.1	0.1	0.9	1												
H ₃	0.2	0.9	0.8	0.8	0.3	1											
H ₆	0.6	0.7	0.1	0.4	0.2	0.5	1										
C ₁	0.6	0.0	0.7	0.7	0.2	0.3	0.5	1									
H ₄	0.0	0.9	0.8	0.2	0.2	0.7	0.8	0.6	1								
C ₂	0.9	0.8	0.4	0.9	0.6	0.5	0.4	0.6	0.0	1							
H ₅	0.3	0.8	0.4	0.0	0.8	0.9	0.6	0.9	0.5	0.5	1						
C ₃	0.2	0.9	0.2	0.4	0.3	0.8	0.1	0.6	0.8	0.5	0.9	1					
H ₇	0.2	0.5	0.2	0.1	0.1	0.7	0.2	0.3	0.2	0.6	0.0	0.4	1				
C ₄	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.6	0.7	0.1	0.0	0.8	0.7	0.3	1			
H ₈	0.4	0.6	0.4	0.9	0.4	0.2	0.5	0.5	0.7	0.7	0.1	0.2	0.9	0.8	1		
H _e	0.5	0.2	0.3	0.5	0.0	0.8	0.8	0.8	0.2	0.7	0.6	0.1	0.3	0.8	0.4	1	
A ₁	0.7	0.7	0.6	0.2	0.8	0.1	0.4	0.7	0.7	0.3	0.6	0.5	0.3	0.8	0.4	0.0	1

Tabla B.22 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo exterior del muro opaco para 2º ensayo

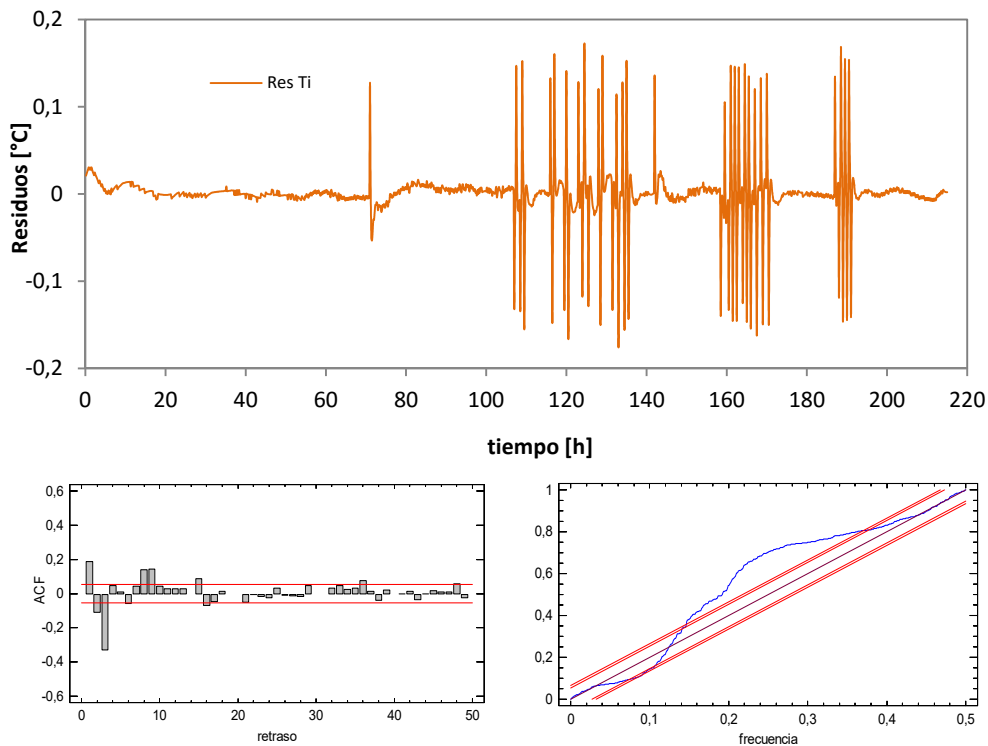


Figura B.25 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro opaco con condiciones exteriores

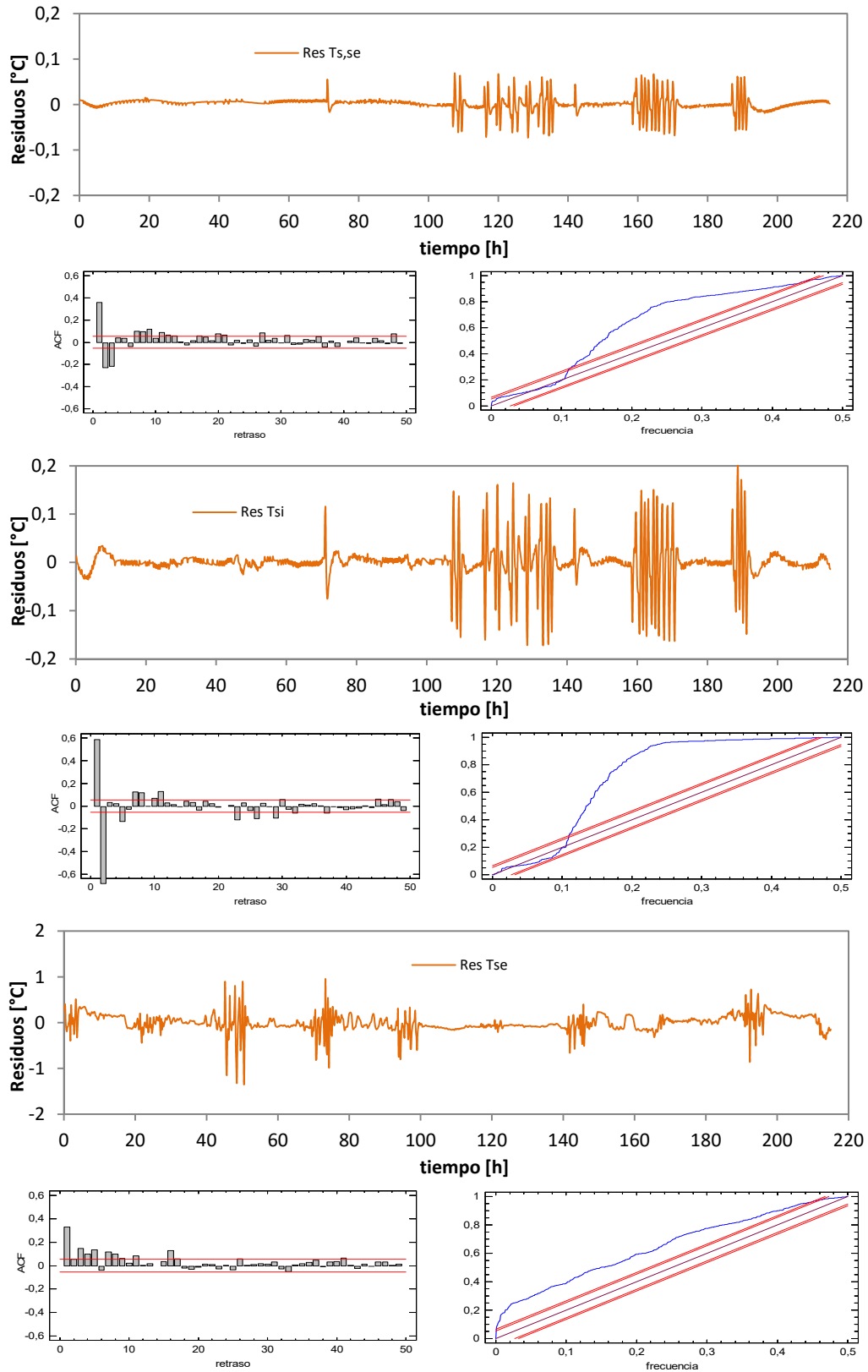


Figura B.26 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro opaco con condiciones exteriores

Con los resultados de los modelos que contemplan las condiciones de temperatura exterior y radiación solar se obtienen los datos mostrados en la Tabla B.23. Se puede concluir que la colocación de la muestra en el portaprobetas no es representativa de cara a efectos de ganancia solar o de coeficiente de transmisión de calor por convección.

	H_e [W/K]	h_e [W/m ² K]	A_{Gv} [m ²]	A_{Gv} [-]
1º ENSAYO	121.6	16.82	1.947	0.269
2º ENSAYO	101.1	13.98	2.042	0.282

Tabla B.23 – Parámetros del intercambio de calor de la superficie del muro opaco con el ambiente exterior

B.2.3 Modelos del segundo componente

Una vez caracterizado el primer componente, se retira la zona central del muro opaco y se sustituye por la ventana de referencia. La colocación de dicha ventana esta definida con precisión en las norma del ensayo interlaboratorios de forma que los efectos de borde seán similares entre centros participantes. A continuación se desarrollan los modelos de identificación de parámetros empleados en el estudio del segundo componente y los resultados que se obtienen.

Modelo simple

El modelo más simple que representa el segundo componente es el que se muestra en la Figura B.27, y cuyas ecuaciones se indican en [B.4] y [B.5].

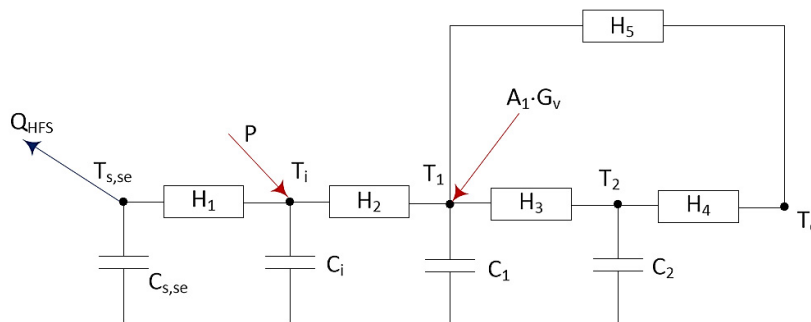


Figura B.27 – Modelo simple de la segunda muestra del IQ-Test

$$\begin{bmatrix} dT_{s,se} \\ dT_i \\ dT_1 \\ dT_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_1}{C_{s,se}} & \frac{H_1}{C_{s,se}} & 0 & 0 \\ \frac{H_1}{C_i} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_i} & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & -(H_2 + H_3 + H_5) & \frac{H_3}{C_1} \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_2} & -(H_3 + H_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} -1 \\ C_{s,se} \\ \frac{1}{C_i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ G_v \\ T_e \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt \quad [B.4]$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,se}^m \\ T_i^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ G_v \\ T_e \end{bmatrix} + [e] \quad [B.5]$$

En este caso se representa reproducen las dos partes de la muestra, muro perimetral mediante una rama con inercia térmica, y la ventana mediante un sola conductancia y sin inercia térmica. La ganancia solar se linca a un nodo interior de la sala de ensayos diferente al nodo de temperatura medida, ya que corresponde con la temperatura del aire en la cámara que se genera entre la cortina y la superficie de la muestra, ya que corresponde con la zona en la que se produce realmente esa entrada directa de flujo y, además, presenta unos coeficiente de convección diferentes a los del resto de superficies de la sala de ensayos. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada periodo de enayo realizado. Se puede observar que los ajustes a ruido blanco no son muy buenos, por lo que el modelo, aunque aproximado, ya que los resultados si son muy cercanos a los valores finales, no reproduce por completo el comportamiento real del componente y, por tanto, exige un aumento en su definición.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H₁	100	300	1000	5.68E+02	5.77E+00	68.2549	-0.0044	-0.0046
C_{s,se}	500	1000	1500	9.78E+02	5.61E+01	95.4879	-0.0013	-0.0015
C_i	1	50	200	8.34E+01	6.00E+00	43.4769	0	0.0043
H₂	10	50	200	7.58E+01	7.18E-01	44.9105	0.0047	-0.0019
C₁	1	50	100	1.82E+01	2.58E+00	24.1541	-0.0009	0.0015
H₃	0.6	1	1000	3.45E+00	4.64E-01	93.7100	0	0.0040
H₅	0.6	1	1000	5.21E+00	5.63E-01	80.0091	0.0027	0
C₂	1	250	500	2.74E+02	3.38E+01	87.1255	0	0.0046
H₄	0.6	1	1000	2.61E+00	1.41E-01	54.7450	0.0014	0.0049
A₁	0.1	1	1.8	1.49E+00	9.46E-02	22.8934	0.0040	0

Tabla B.24 – Resultados identificación parámetros para 1º ensayo en el modelo simple del muro con ventana

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C ₁	H ₃	H ₅	C ₂	H ₄	A ₁
H₁	1									
C_{s,se}	0.21	1								
C_i	0.31	0.55	1							
H₂	0.22	0.02	0.47	1						
C₁	0.46	0.23	0.37	0.38	1					
H₃	0.56	0.43	0.22	0.43	0.54	1				
H₅	0.26	0.59	0.15	0.36	0.07	0.13	1			
C₂	0.17	0.01	0.08	0.60	0.39	0.23	0.48	1		
H₄	0.26	0.05	0.24	0.01	0.32	0.04	0.50	0.10	1	
A₁	0.14	0.37	0.13	0.03	0.46	0.42	0.18	0.48	0.08	1

Tabla B.25 – Coeficientes de correlación parámetros modelo simple del muro con ventana para 1º ensayo

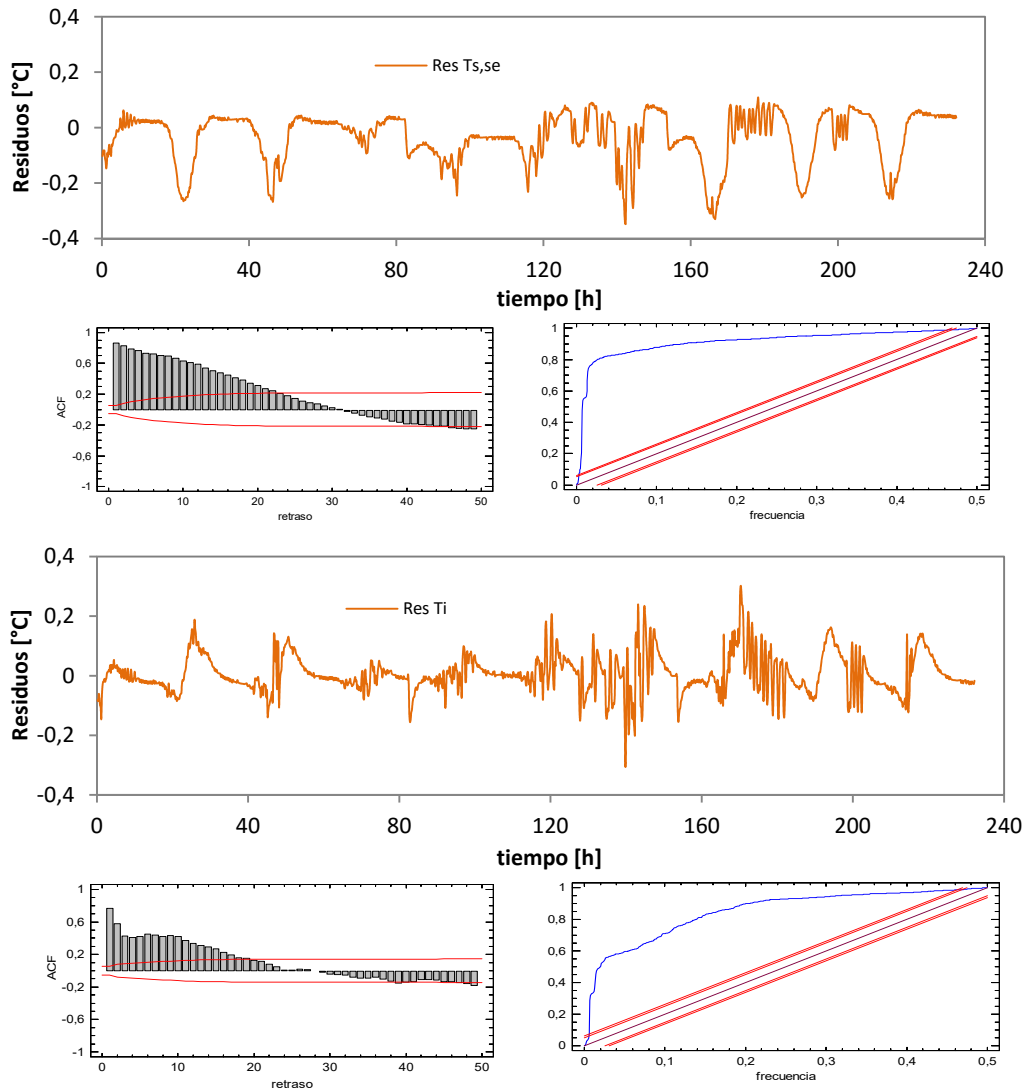


Figura B.28 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro con ventana en el modelo simple

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	100	300	1000	3.86E+02	6.22E+01	47.8255	0.0015	0.0020
$C_{s,se}$	500	1000	1500	9.81E+02	6.04E+01	26.6858	0.0045	0.0027
C_1	1	50	200	3.90E+01	5.02E-01	52.4892	-0.0015	0.0026
H_2	10	50	200	4.95E+01	6.87E-01	86.7224	-0.0043	0.0042
C_1	1	50	100	6.63E+01	6.91E+00	70.6388	0.0048	-0.0048
H_3	0.6	1	1000	2.25E+00	2.50E-01	48.1325	0.0040	0
H_5	0.6	1	1000	4.93E+00	6.49E-01	14.1684	-0.0019	0
C_2	1	250	500	2.27E+02	3.67E+01	31.3701	0	0.0034
H_4	0.6	1	1000	3.54E+00	3.24E-01	11.7806	-0.0033	0.0025
A_1	0.1	1	1.8	1.15E+00	3.63E-02	62.2355	-0.0014	0

Tabla B.26 – Resultados identificación parámetros para 2º ensayo en el modelo simple del muro con ventana

	H_1	$C_{s,se}$	C_i	H_2	C_1	H_3	H_5	C_2	H_4	A_1
H_1	1									
$C_{s,se}$	0.19	1								
C_i	0.47	0.00	1							
H_2	0.33	0.41	0.54	1						
C_1	0.33	0.24	0.56	0.49	1					
H_3	0.04	0.36	0.25	0.31	0.07	1				
H_5	0.17	0.12	0.17	0.32	0.36	0.21	1			
C_2	0.60	0.23	0.03	0.32	0.27	0.05	0.27	1		
H_4	0.29	0.43	0.37	0.08	0.17	0.25	0.18	0.26	1	
A_1	0.05	0.13	0.27	0.10	0.09	0.41	0.60	0.59	0.46	1

Tabla B.27 – Coeficientes de correlación parámetros modelo simple del muro con ventana para 2º ensayo

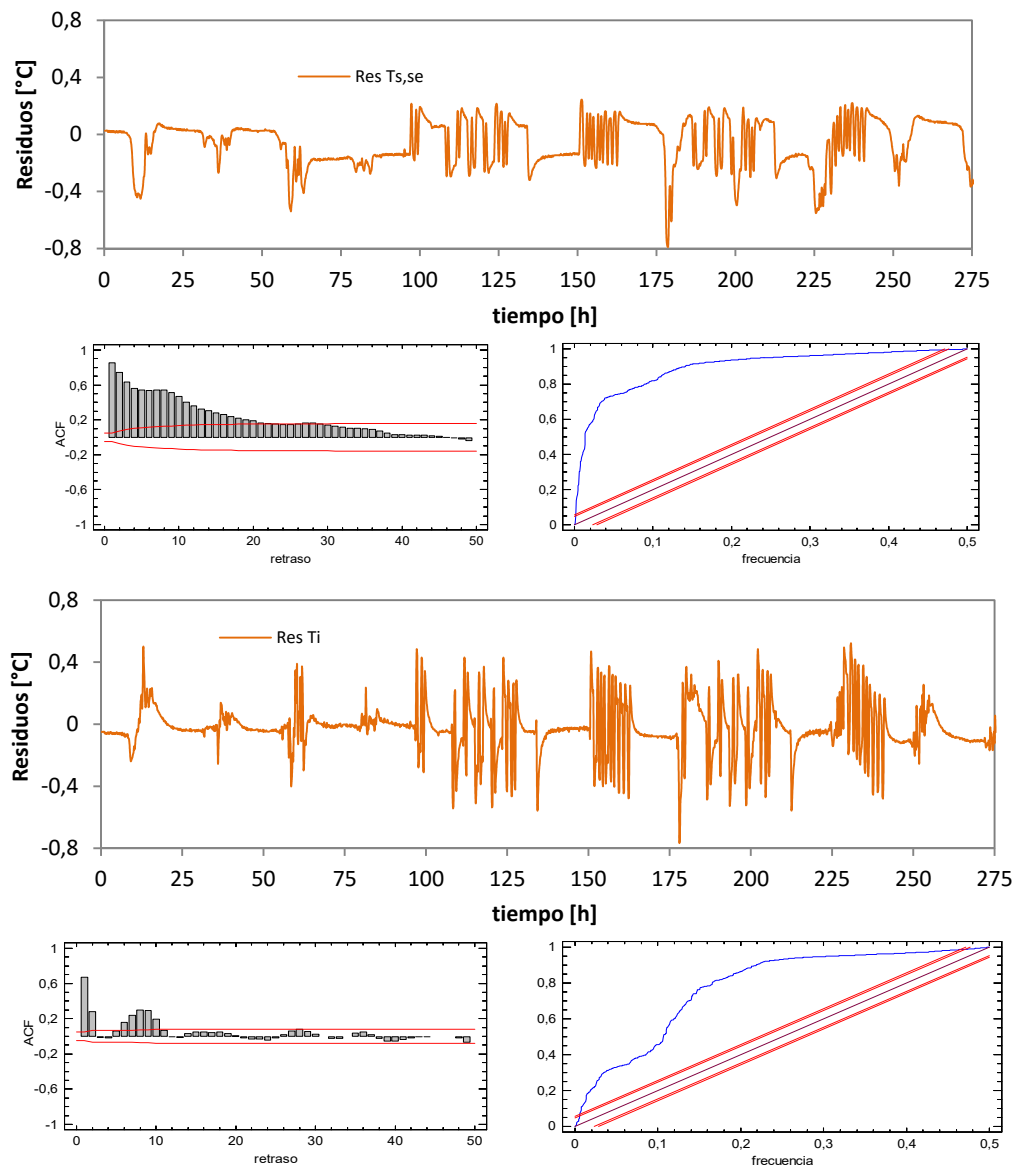


Figura B.29 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro con ventana en el modelo simple

Modelo ampliado

El modelo simple es insuficiente para representar con precisión el comportamiento real de la probeta del segundo componente del ensayo IQ-Test. En principio, la parte de la ventana es la que menor complejidad representa, sin embargo la parte opaca es más delicada. Por un lado, es necesario ampliar el orden del modelo para poder representar adecuadamente la capacidad térmica del perímetro aislante, y por otro lado, la superficie exterior esta recibiendo incidencia solar que genera periodos en los que la superficie exterior es mayor que la temperatura de la superficie interior. Esta situación es imposible de reproducir con el modelo simple definido previamente. Por estas cuestiones se define un modelo ampliado como el que se muestra en la Figura B.30. En las ecuaciones [B.6] y [B.7].

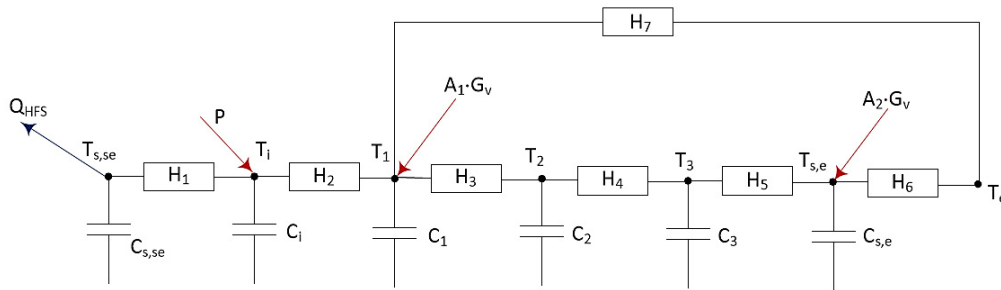


Figura B.30 – Modelo ampliado de la segunda muestra del IQ-Test

$$\begin{bmatrix} dT_{s,se} \\ dT_i \\ dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{se} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_1}{C_{s,se}} & \frac{H_1}{C_{s,se}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_1}{C_i} & \frac{-(H_1 + H_2)}{C_i} & \frac{H_2}{C_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & \frac{-(H_2 + H_3 + H_7)}{C_1} & \frac{H_3}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_2} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_2} & \frac{H_4}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_3} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_3} & \frac{H_5}{C_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_{se}} & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_{se}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{se} \end{bmatrix} dt \quad [B.6]$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{s,se}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_1}{C_1} & \frac{H_7}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_2}{C_{se}} & \frac{H_6}{C_{se}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ G_v \\ T_e \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,se}^m \\ T_i^m \\ T_1^m \\ T_2^m \\ T_3^m \\ T_{se}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{se} \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ G_v \\ T_e \end{bmatrix} + [e] \quad [B.7]$$

A continuación se recogen los resultados de los modelos de identificación de parámetros junto con el análisis de ruido blanco de los residuos de las funciones objetivo.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	2.57E+02	7.74E+01	56.7507	0.0001	-0.0003
C _{s,se}	500	1000	1500	9.77E+02	8.24E+01	95.4879	-0.0004	0.0002
C _i	1	50	200	7.52E+01	5.16E-01	43.4769	-0.0001	-0.0005
H ₂	10	50	200	9.80E+01	2.34E-01	44.9105	0.0003	0.0000
C ₁	1	50	100	5.10E+01	1.92E+00	24.1541	-0.0004	-0.0003
H ₃	0.6	1	1000	2.02E+02	4.78E-01	93.7100	0.0004	0.0004
H ₇	0.6	1	1000	5.73E+00	2.57E-01	80.0091	0.0002	0.0004
C ₂	1	100	500	1.07E+02	2.89E+01	87.1255	0.0001	0.0002
H ₄	0.6	1	1000	2.85E+00	3.21E-01	54.7450	-0.0003	-0.0004
C ₃	1	100	500	7.14E+01	6.69E+00	22.8934	0.0000	0.0004
H ₅	0.6	1	1000	2.19E+00	4.87E-02	22.8934	0.0001	0.0002
C _{se}	1	50	100	9.82E+01	2.59E+00	22.8934	0.0000	0.0002
H ₆	0.6	1	1000	1.25E+02	3.09E-01	22.8934	-0.0004	-0.0003
A ₁	0.1	1	1.8	1.06E+00	1.04E-01	22.8934	-0.0003	0.0005
A ₂	0.1	1	5	1.61E+00	3.57E-01	22.8934	0.0005	0.0002

Tabla B.28 – Resultados identificación parámetros para 1º ensayo en el modelo ampliado del muro con ventana

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C ₁	H ₃	H ₇	C ₂	H ₄	C ₃	H ₅	C _{se}	H ₆	A ₁	A ₂
H ₁	1														
C _{s,se}	0.18	1													
C _i	0.46	0.09	1												
H ₂	0.27	0.40	0.03	1											
C ₁	0.42	0.22	0.07	0.08	1										
H ₃	0.38	0.02	0.51	0.23	0.54	1									
H ₇	0.45	0.25	0.31	0.60	0.46	0.17	1								
C ₂	0.13	0.07	0.26	0.04	0.06	0.10	0.19	1							
H ₄	0.40	0.57	0.26	0.40	0.41	0.49	0.13	0.24	1						
C ₃	0.36	0.11	0.08	0.45	0.32	0.07	0.51	0.21	0.08	1					
H ₅	0.28	0.01	0.52	0.47	0.06	0.24	0.53	0.15	0.44	0.17	1				
C _{se}	0.10	0.07	0.25	0.51	0.37	0.42	0.20	0.47	0.48	0.11	0.31	1			
H ₆	0.02	0.28	0.35	0.35	0.06	0.51	0.35	0.38	0.38	0.06	0.15	0.28	1		
A ₁	0.36	0.54	0.48	0.35	0.39	0.58	0.09	0.20	0.41	0.41	0.09	0.52	0.46	1	
A ₂	0.30	0.24	0.53	0.17	0.27	0.43	0.30	0.28	0.12	0.31	0.38	0.11	0.53	0.06	1

Tabla B.29 – Coeficientes de correlación parámetros modelo ampliado del muro con ventana para 1º ensayo

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]	dgA [m ²]
Q _{HFS}	1	W	0.006	0.039	0.009
P	0.5	W	0.006	0.017	0.004
G _v	1.5	W	0.041	0.022	0.002
T _e	0.5	K	0.089	0.062	0.005

Tabla B.30 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación en el modelo ampliado para el primer ensayo

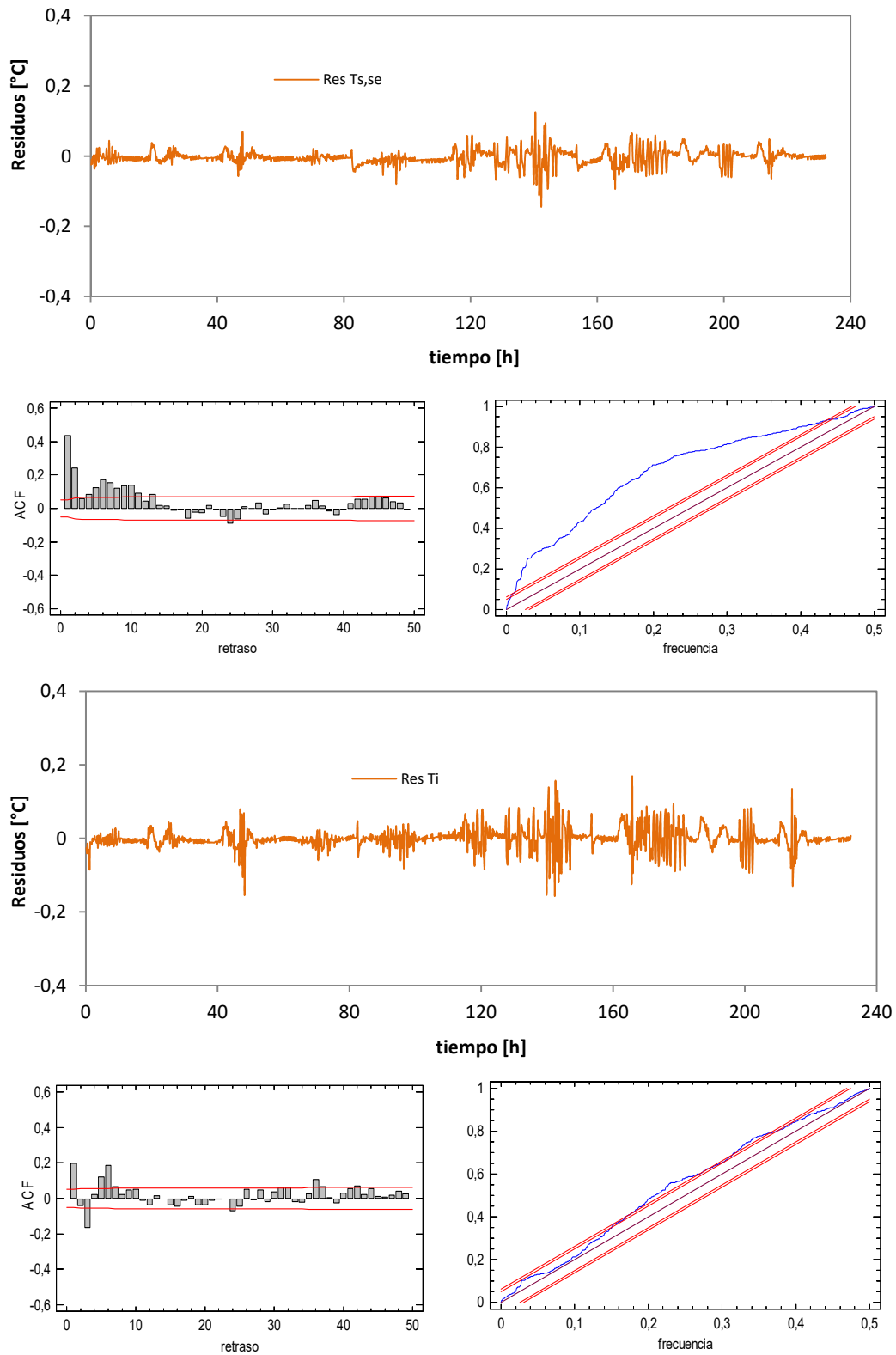


Figura B.31 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro con ventana en el modelo ampliado

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	3.00E+02	9.82E+01	65.1649	0.0017	-0.0010
C _{s,se}	500	1000	1500	1.10E+03	2.17E+01	58.2212	0.0040	-0.0004
C _i	1	50	200	2.94E+01	2.94E+01	49.7937	0.0012	-0.0046
H ₂	10	50	200	6.72E+01	4.52E+00	1.5591	0.0023	0.0025
C ₁	1	50	100	5.73E+01	9.03E+00	86.8745	-0.0009	0.0030
H ₃	0.6	1	1000	5.97E+00	6.23E-02	24.6662	0.0023	0.0036
H ₇	0.6	1	1000	5.38E+00	2.48E-01	70.3356	0.0039	0.0026
C ₂	1	100	500	3.42E+01	4.30E+00	35.8863	-0.0043	-0.0036
H ₄	0.6	1	1000	1.70E+00	4.65E-02	56.2171	0.0012	-0.0010
C ₃	1	100	500	1.25E+02	1.73E+01	28.9478	0.0023	-0.0002
H ₅	0.6	1	1000	6.95E+00	1.10E-01	96.2672	-0.0002	-0.0033
C _{se}	1	50	100	8.56E+01	4.61E+00	71.7773	0.0015	0.0005
H ₆	0.6	1	1000	1.83E+02	8.14E-01	55.6629	0.0011	0.0047
A ₁	0.1	1	1.8	1.01E+00	8.56E-02	84.2077	-0.0008	-0.0012
A ₂	0.1	1	5	1.70E+00	8.31E-02	12.4660	-0.0044	0.0024

Tabla B.31 – Resultados identificación parámetros para 2º ensayo en el modelo ampliado del muro con ventana

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C ₁	H ₃	H ₇	C ₂	H ₄	C ₃	H ₅	C _{se}	H ₆	A ₁	A ₂
H ₁	1														
C _{s,se}	0.55	1													
C _i	0.49	0.55	1												
H ₂	0.16	0.22	0.25	1											
C ₁	0.01	0.30	0.51	0.48	1										
H ₃	0.22	0.45	0.35	0.50	0.55	1									
H ₇	0.03	0.46	0.39	0.12	0.17	0.07	1								
C ₂	0.59	0.38	0.44	0.50	0.14	0.49	0.35	1							
H ₄	0.05	0.51	0.20	0.24	0.09	0.55	0.48	0.27	1						
C ₃	0.41	0.54	0.12	0.10	0.04	0.37	0.29	0.45	0.03	1					
H ₅	0.32	0.41	0.28	0.50	0.38	0.02	0.21	0.29	0.27	0.03	1				
C _{se}	0.26	0.42	0.37	0.39	0.13	0.29	0.05	0.35	0.57	0.06	0.32	1			
H ₆	0.19	0.26	0.28	0.33	0.28	0.26	0.53	0.06	0.14	0.52	0.02	0.27	1		
A ₁	0.11	0.33	0.14	0.37	0.20	0.21	0.10	0.59	0.44	0.30	0.49	0.32	0.47	1	
A ₂	0.58	0.28	0.45	0.24	0.07	0.47	0.42	0.24	0.21	0.01	0.06	0.43	0.36	0.56	1

Tabla B.32 – Coeficientes de correlación parámetros modelo ampliado del muro con ventana para 2º ensayo

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]	dgA [m ²]
Q _{HFS}	1	W	0.008	0.047	0.007
P	0.5	W	0.007	0.049	0.001
G _v	1.5	W	0.039	0.026	0.004
T _e	0.5	K	0.051	0.059	0.008

Tabla B.33 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación en el modelo ampliado para el segundo ensayo

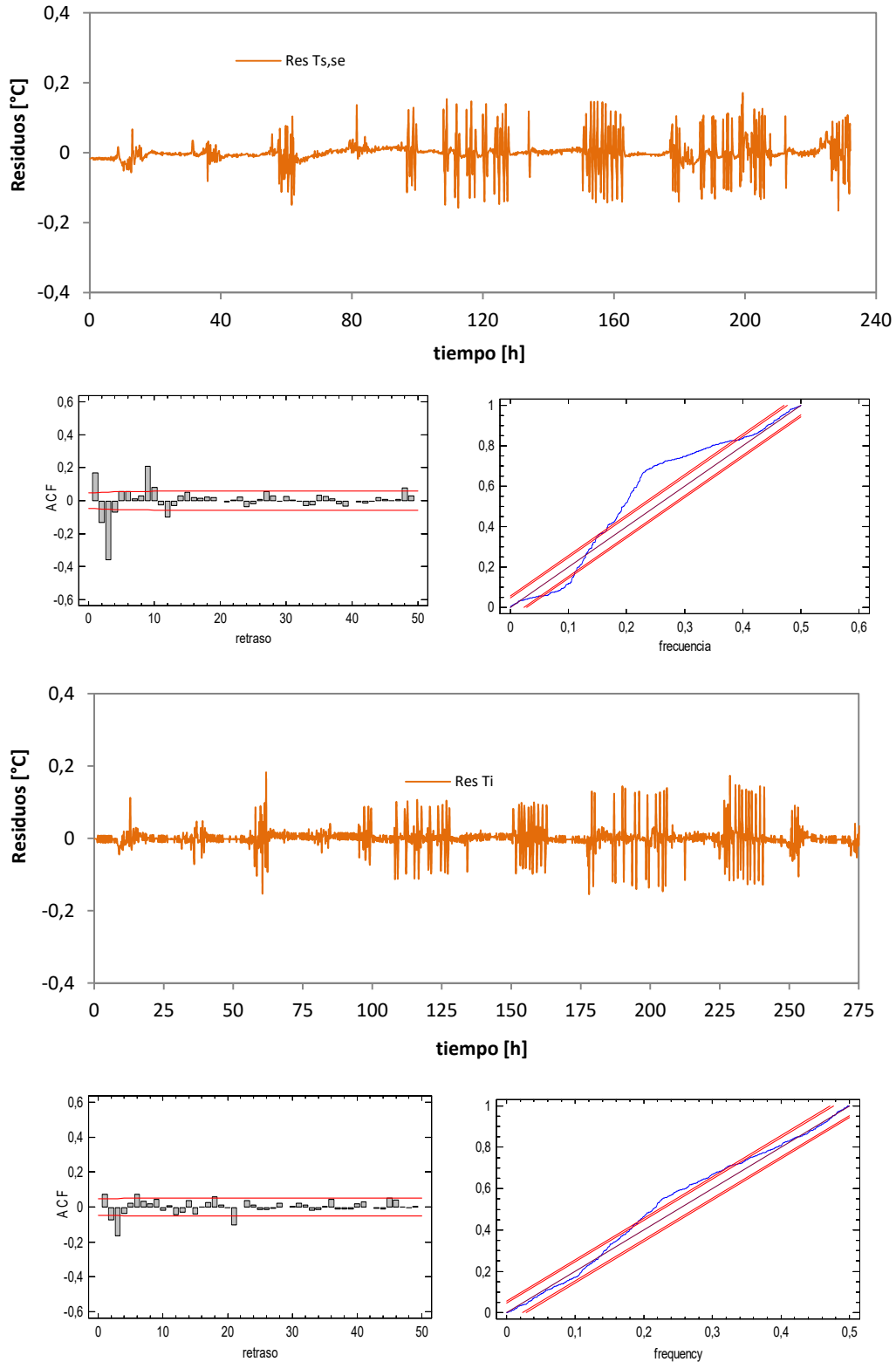


Figura B.33 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro con ventana en el modelo ampliado

En base a los datos obtenidos con el modelo ampliado del segundo componente, y teniendo en cuenta los resultados de los ensayos del muro opaco, junto con las incertidumbres de medida, se obtienen los valores recogidos en la Tabla B.34.

	Muro Completo			Ventana			
	Opaco + Ventana						
	UA [W/K]	UA [W/K]	gA [m ²]	U [W/m ² K]	e _U [W/m ² K]	g [-]	e _g [-]
1º ENSAYO	6,95	5,43	1,06	2,89	0,22	0,57	0,06
2º ENSAYO	6,48	5,22	1,01	2,78	0,18	0,54	0,05

Tabla B.34 – Resultados de los dos ensayos del segundo componente del IQ-Test

De cara al ensayo interlaboratorio, se emplean los resultados obtenidos en el segundo ensayo, tanto para el primer componente como para el segundo. Ya que, cómo se ha detectado en el estudio de las dos posiciones de la muestra dentro del portaprobetas, la colocación a ras del interior reduce los efectos de puentes térmicos, mejorando la precisión del ensayo sin afectar a los parámetros exteriores, coeficiente de convección y factor solar.

Anexo C

Caracterización experimental de fachadas



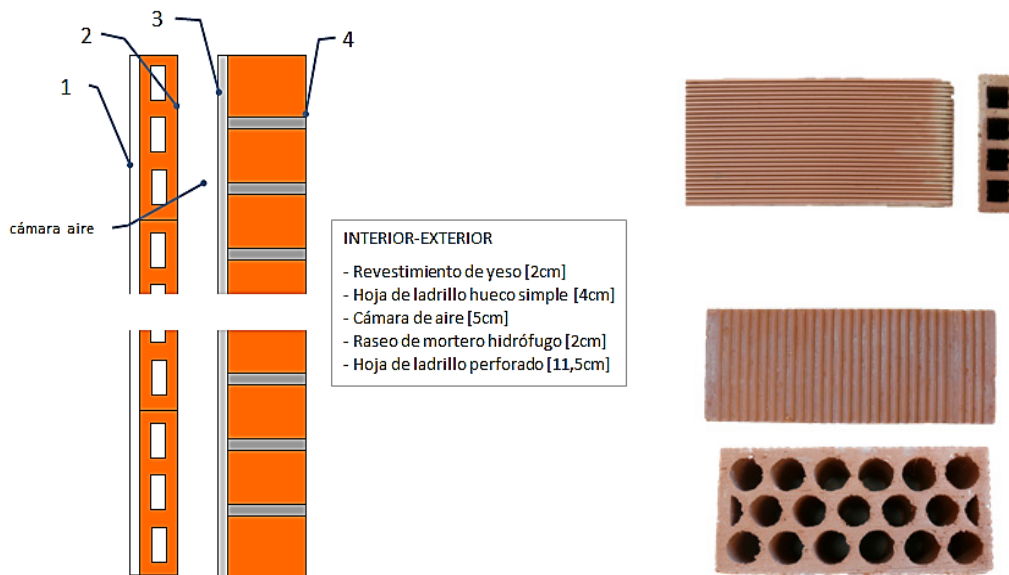


C.1 Muro base

Debido a la gran cantidad de información respecto a la instrumentación instalada en las probetas ensayadas, así como los datos de los ensayos de contraste, en la Memoria se indican los valores fundamentales. A continuación se desarrollan con más detalle estos aspectos de los ensayos experimentales.

C.1.1 Instrumentación de la muestra

El primer componente de ensayo es un muro de doble hoja formada por fábrica de ladrillo. En la Figura C.1 se muestran las características de la muestra y un detalle de los bloques cerámicos empleados.



Aunque se trata de la probeta de ensayo más sencilla, su caracterización precisa es fundamental, ya que sirve como base para el resto de ensayos de la presente tesis, salvo en el caso de la probeta de fachada ligera forzada. En la Tabla C.1 se muestra el número de sensores instalados en dicha probeta.

MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES					
		CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5	CAPA 6	
MURO BASE	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	3	3		
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1			

Tabla C.1 – Sensores instaladas en la probeta del muro base y en el muro aislado

En total, se instalan 15 sensores de temperatura y 4 sensores de flujo de calor, en la Figura C.2 se muestran la distribución de dichos sensores en las diferentes capas que conforman la muestra. Las diferentes sondas se referencian mediante el

procedimiento estandarizado de trazabilidad de la metodología *PASLINK*, así como mediante un referencia propia de la muestra que facilita su análisis y tratamiento posterior. También se emplean los número de referencia de las sondas propias de la base de datos de instrumentación del Área Térmica, AT, del Laboratorio de Control de la Calidad en la Edificación, LCCE, que permiten asociar las calibraciones correspondientes.

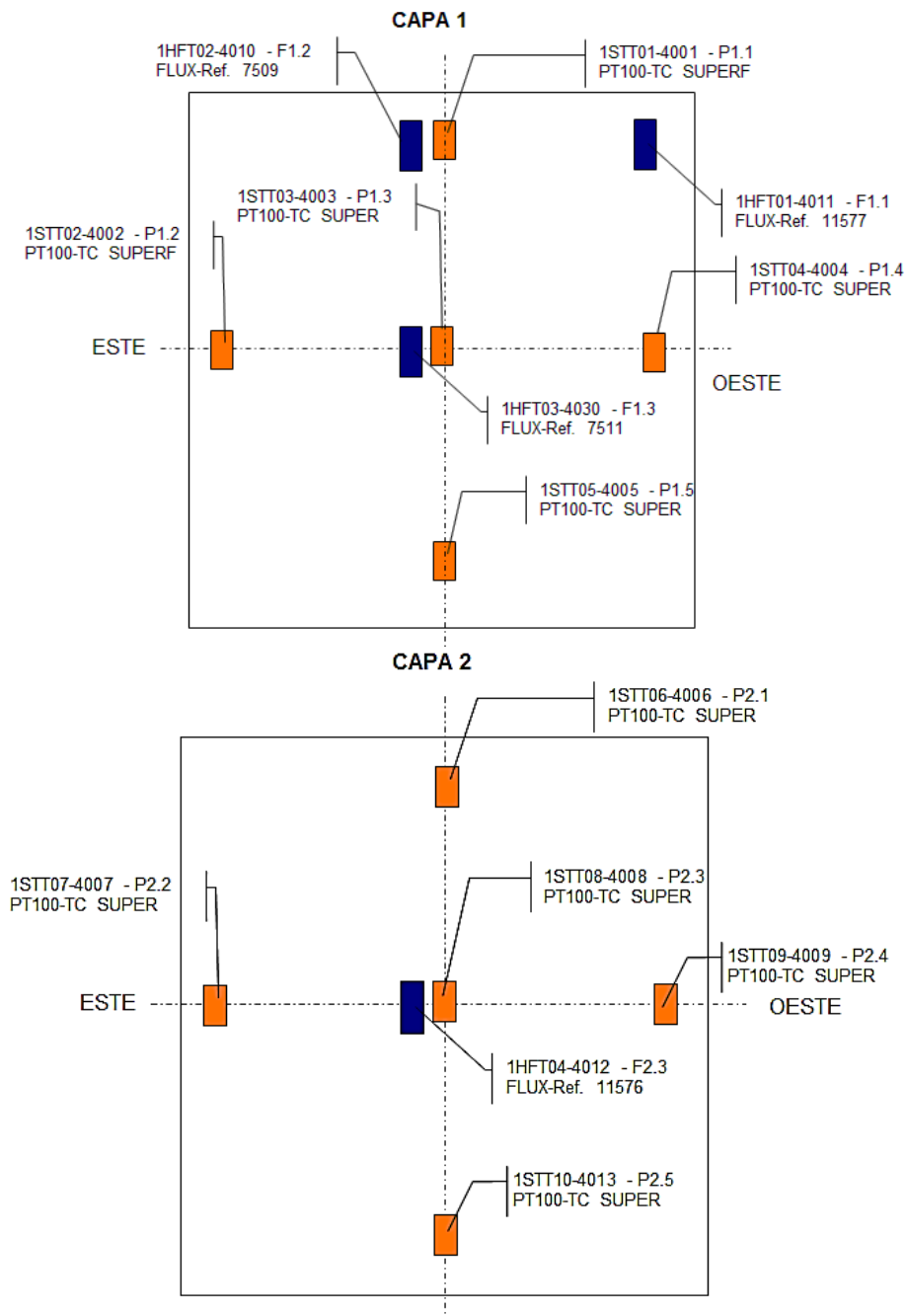


Figura C.2 – Disposición de las sondas en las capas de la muestra de muro base

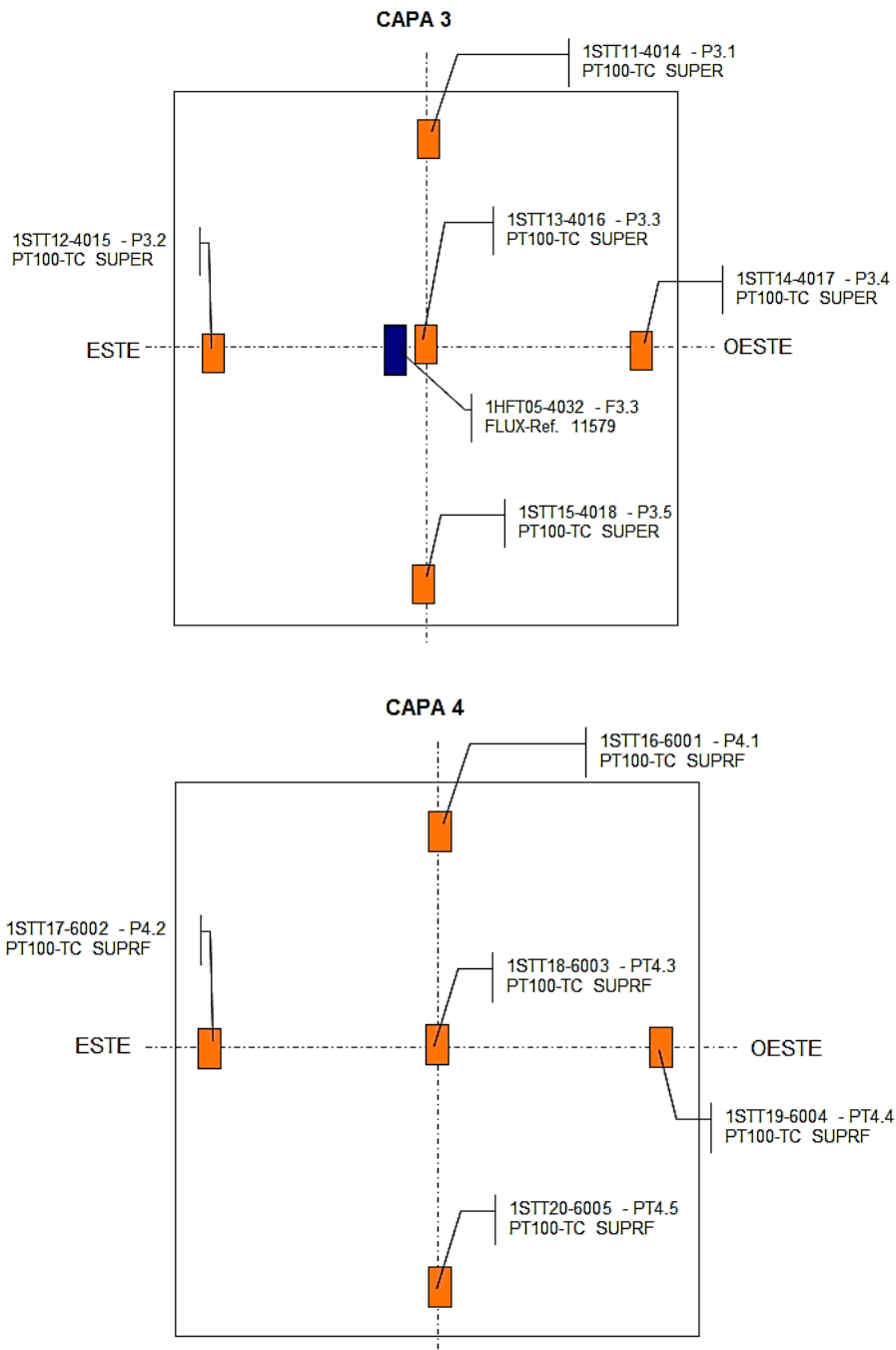


Figura C.3 – Disposición de las sondas en las capas de la muestra de muro base

C.1.2 Datos experimentales complementarios

A continuación se recogen los datos complementarios del ensayo que se realiza sobre la muestra de muro base y que no se indican en la Memoria debido a su extensión. En la Figura C.4 se muestran las temperaturas de control del entorno de la sala de ensayos. Por un lado, las temperaturas de aire en cubierta y suelo de la celda, así como la registrada por la estación meteorológica situada a 10 [m] de altura. También se

muestran la temperatura de aire de la sala de servicio junto con la temperatura superficial de la pared de acceso a la sala de ensayos.

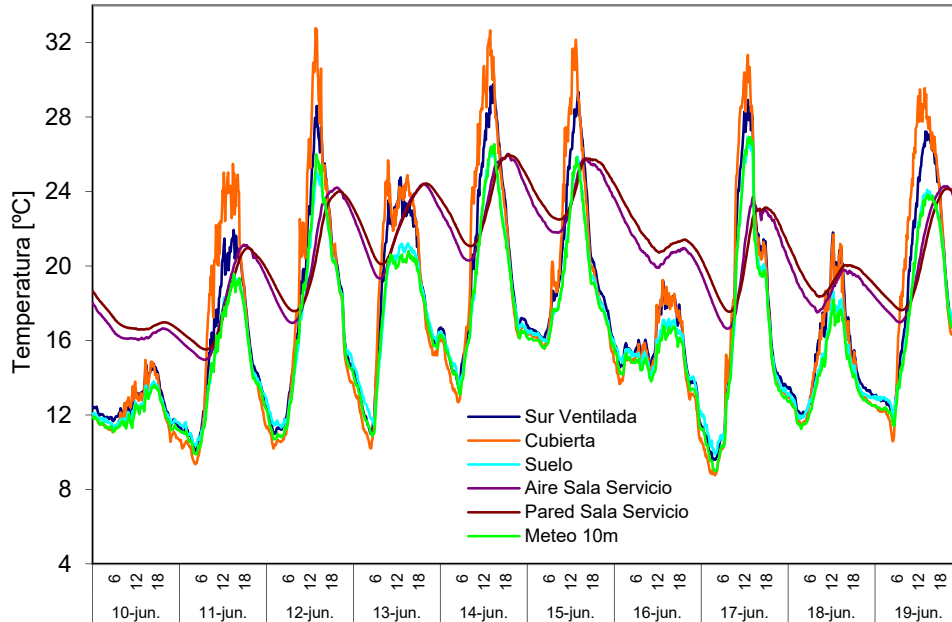


Figura C.4 – Temperaturas del entorno de la celda durante el ensayo del muro base

En la Figura C.5 y en la Figura C.6 se muestran las temperaturas registradas por las sonda de aire y de superficie en la sala de ensayos. La media de estas sondas se emplean para determinar la temperas empleadas en los modelos para representar el comportamiento de la celda.

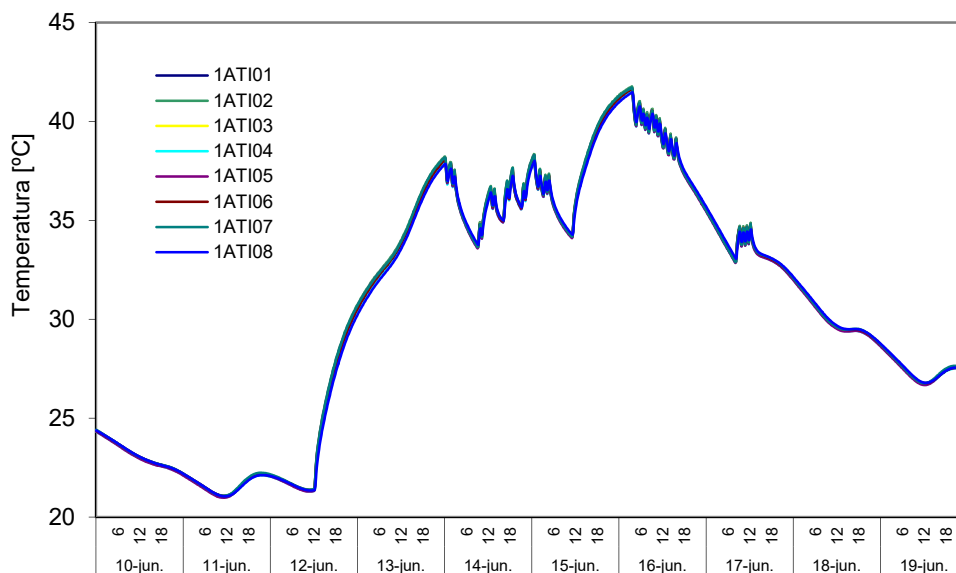


Figura C.5 – Temperaturas de aire en la sala de ensayo durante el ensayo del muro base

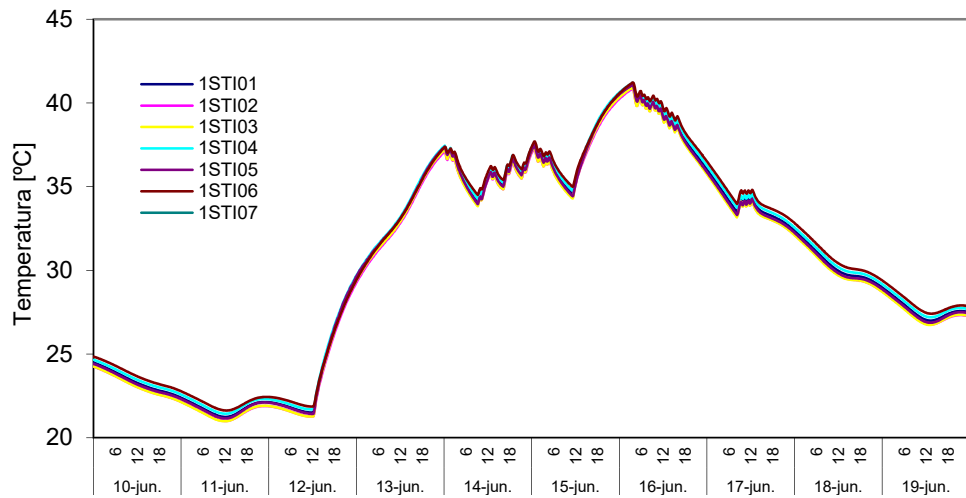


Figura C.6 – Temperaturas de superficie en la sala de ensayo durante el ensayo del muro base

En la Figura C.7 y Figura C.8 se muestran los flujos de calor que registra cada grupo de tiles de la envolvente de la sala de ensayos.

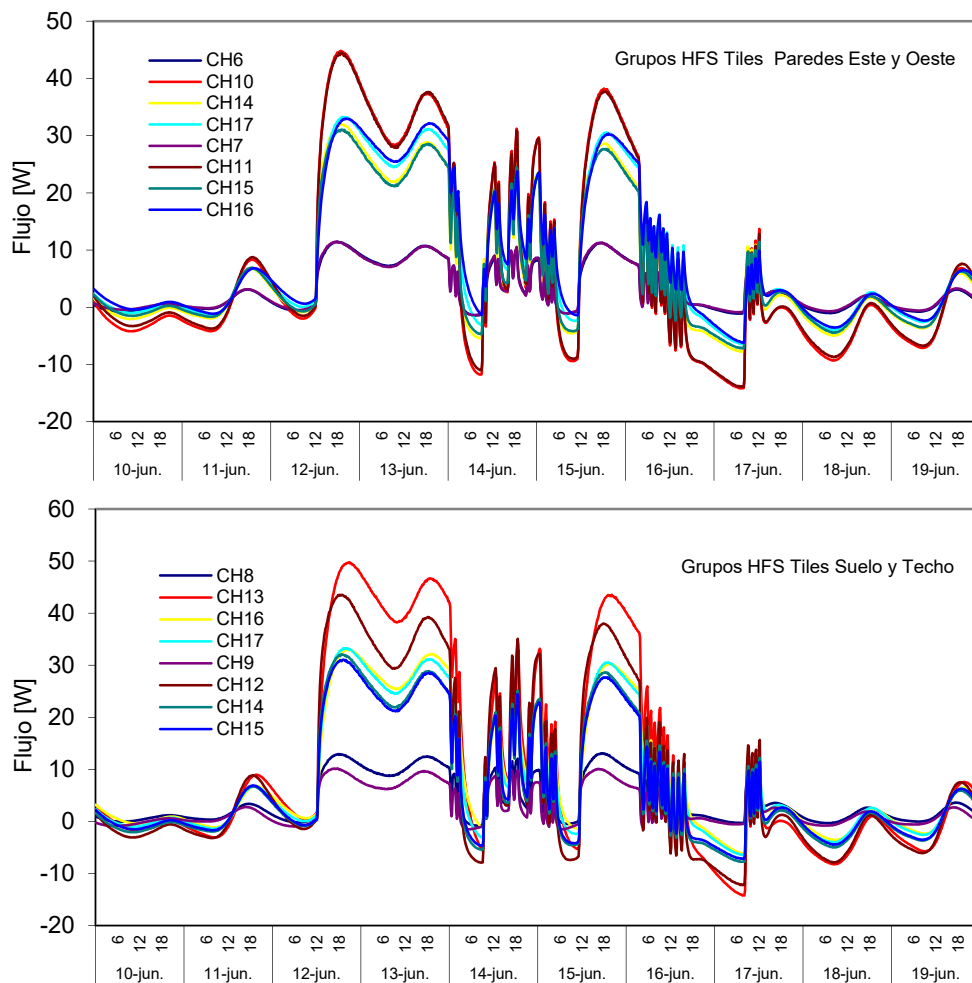


Figura C.7 – Flujos de calor medidos por los grupos de tiles durante el ensayo del muro base

En la Figura C.8 y en la Figura C.9 se muestran las señales de los sensores de las multitiles situadas en los grupos de borde de referencia. Estos flujos permiten determinar, para cada instante, los factores de corrección de las lecturas de flujo en dichas zonas donde el flujo es bidimensional.

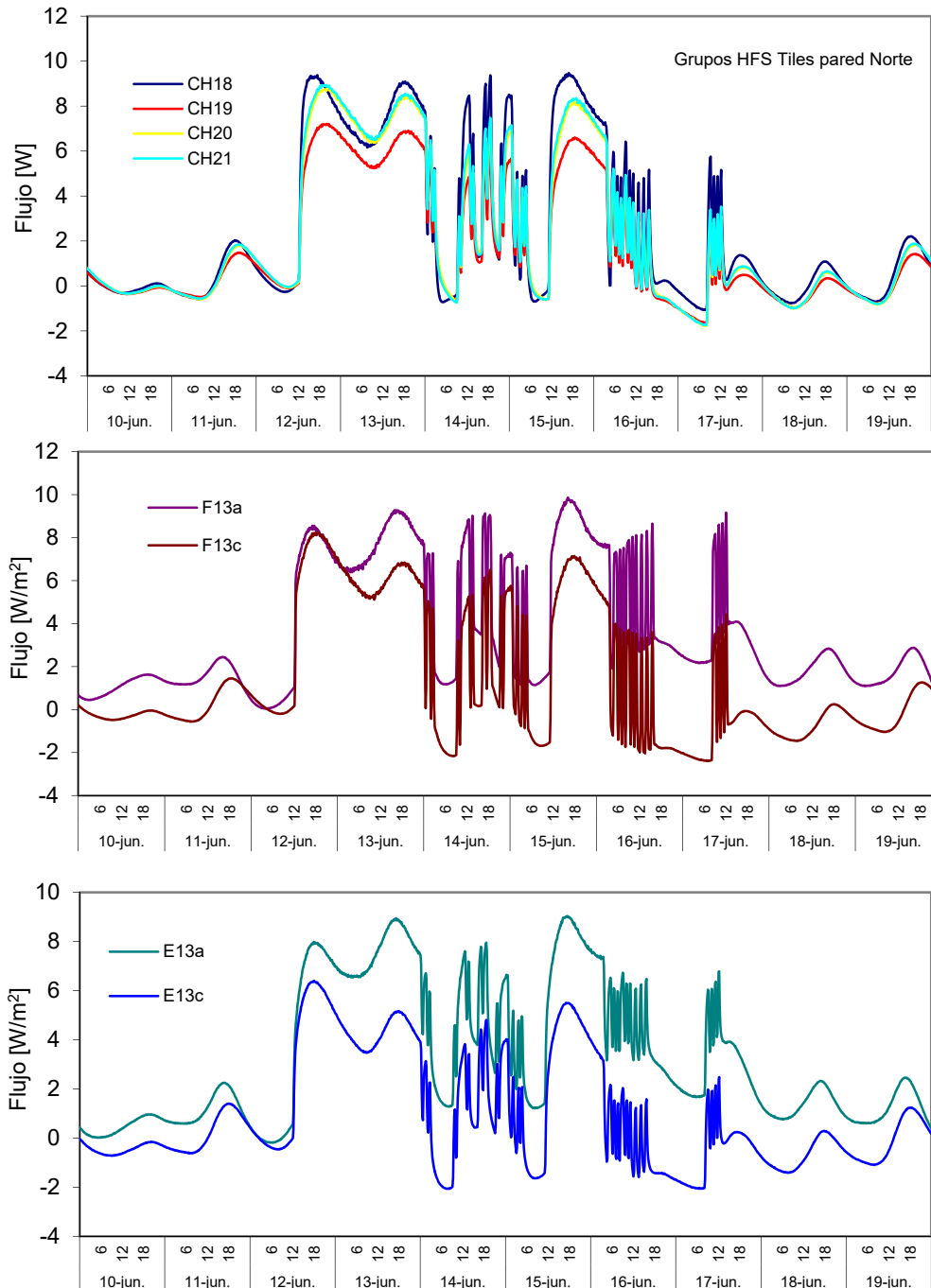


Figura C.8 – Flujos de calor medidos por las *multitiles* las durante el ensayo del muro base

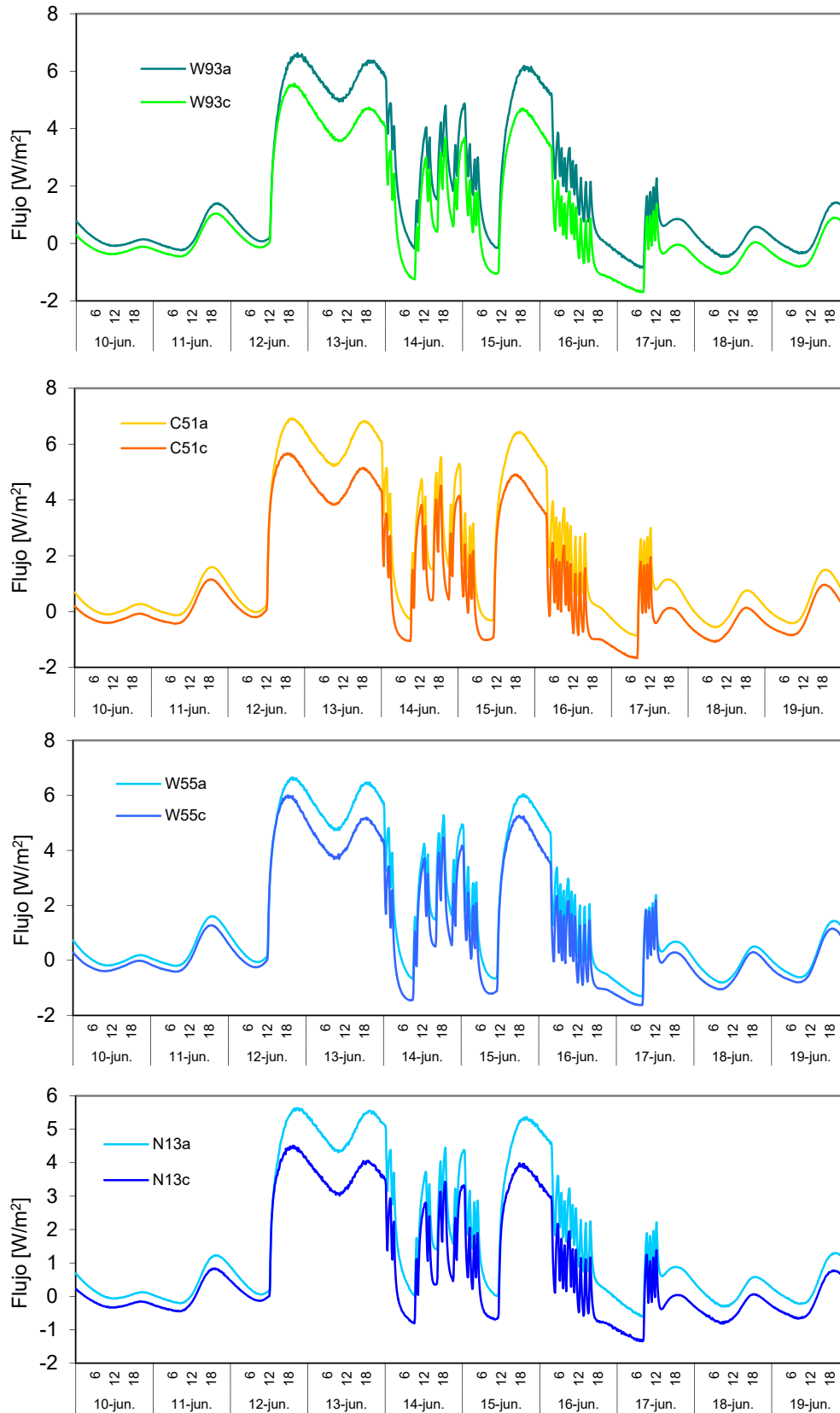


Figura C.9 – Flujos de calor medidos por las *multitiles* las durante el ensayo del muro base

En las Figuras C.10 y Figuras C.11 se muestran las lecturas de cada sonda de temperatura instalada en las diferentes capas de la muestra de muro base.

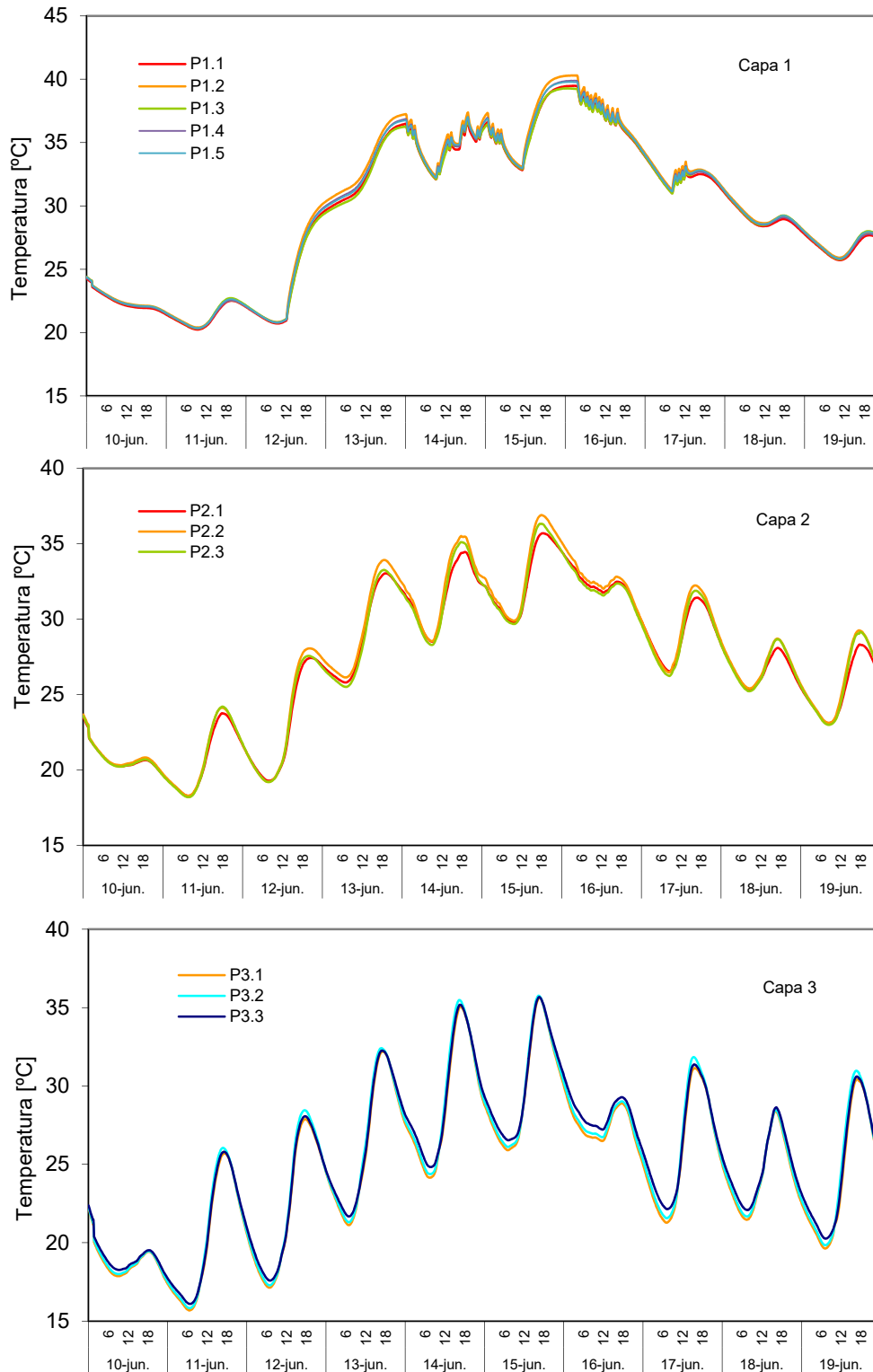


Figura C.10 – Temperaturas en cada capa durante el ensayo del muro base

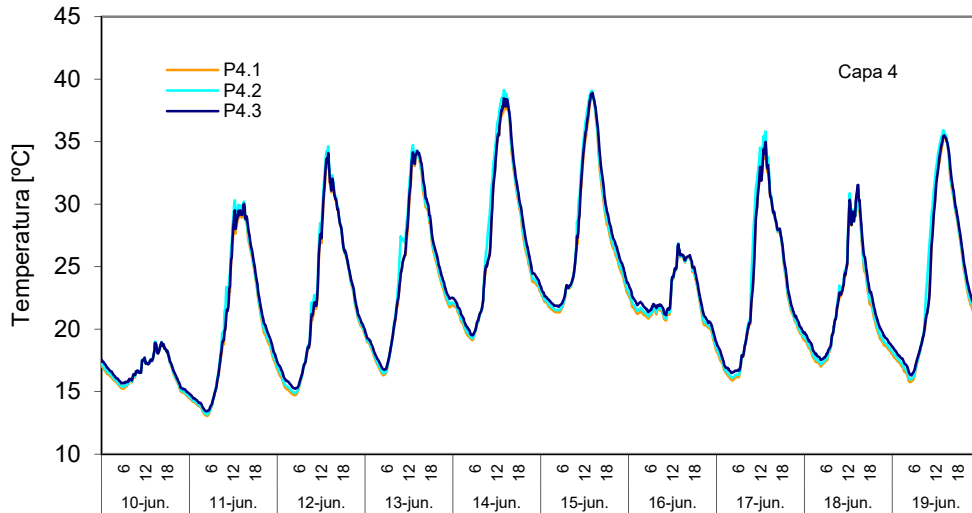


Figura C.11 – Temperaturas en cada capa durante el ensayo del muro base

C.2 Muro base con aislamiento

La colocación del aislamiento sobre la superficie exterior es sencilla y directa. A continuación se muestran los datos de instrumentación añadida sobre la probeta y los datos experimentales complementarios para obtener las variables de análisis mostradas en la Memoria.

C.2.1 Instrumentación de la muestra

En la Figura C.12 se muestra el esquema de montaje del aislante rematado por una capa de mortero con malla de tracción. En la Tabla C.2 se indica la instrumentación total instalada en la probeta.

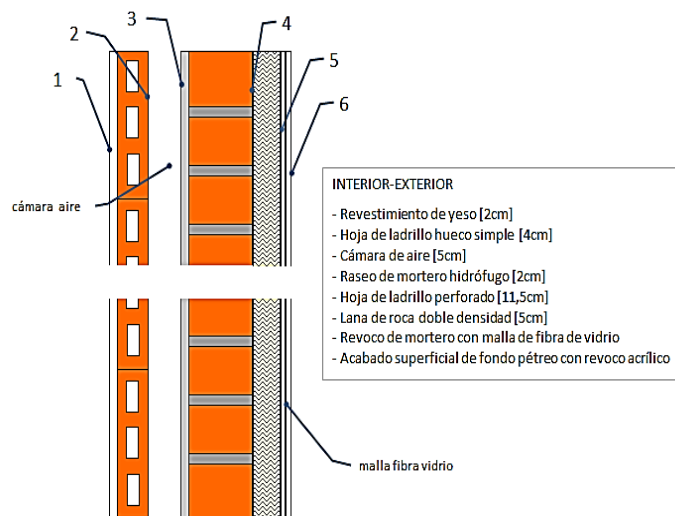


Figura C.12 – Solución constructiva del SATE aplicado al muro base

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES				
			CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5	CAPA 6
MURO BASE +SATE	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5			5
	Temperatura	Termopar tipo T			5	5	
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1	2	2	

Tabla C.2 – Sensores instaladas en la probeta del muro base y en el muro aislado

En total se instalan 30 sondas de temperatura de las cuales 20 son PT100 y 10 son termopares tipo T. Se emplean termopares en las intercapas en las que la sondas se recubre de mortero, yeso, o algún tipo de masa húmeda que puede dañar la termorresistencia. Además se instalan 8 sensores de flujo de calor. En la Figura C.13 y en la Figura C.14 se muestra la distribución de la instrumentación colocada que difiere de la instrumentación original del muro base ya mostrada.

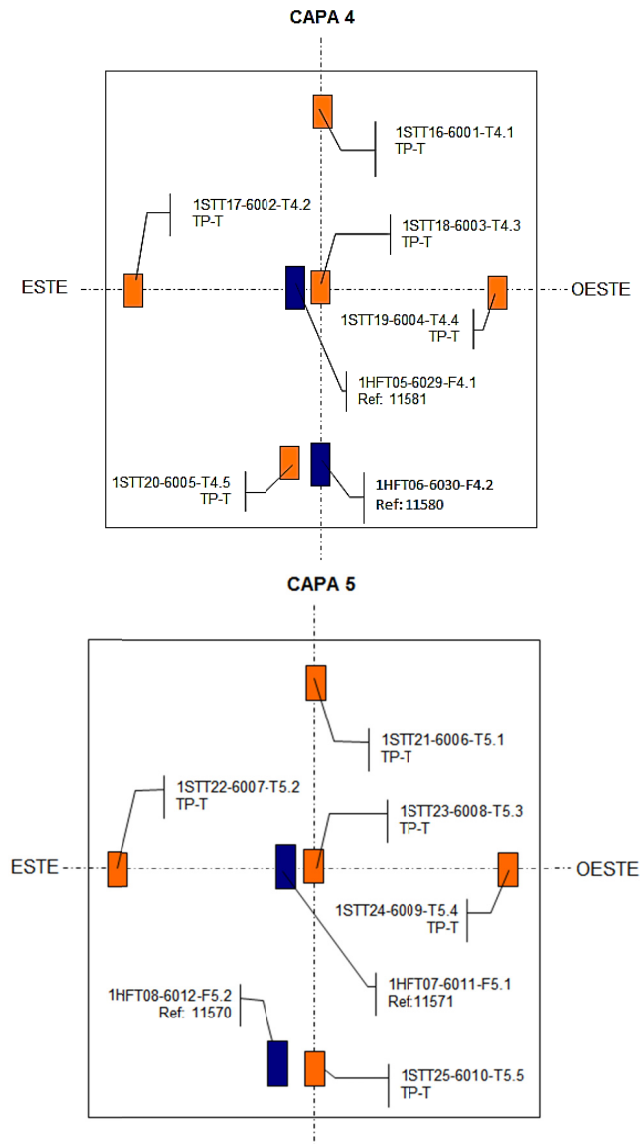


Figura C.13 – Instrumentación añadida al muro base con aislamiento

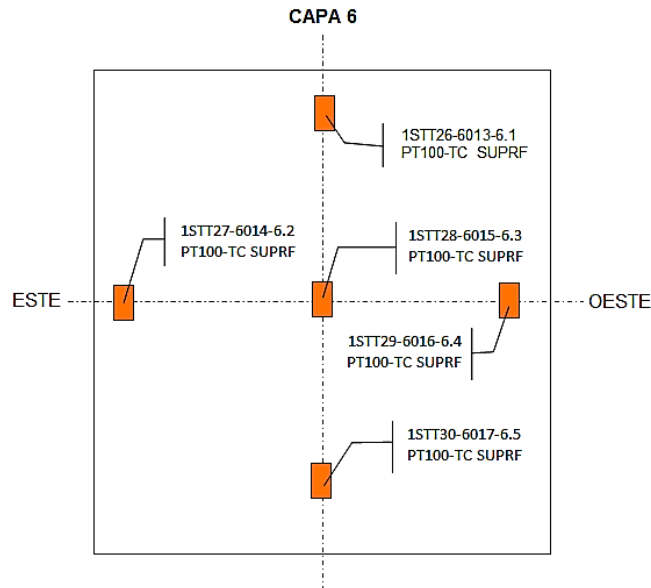


Figura C.14 – Instrumentación añadida al muro base con aislamiento

C.2.2 Datos experimentales complementarios

Como en el caso del muro base, la caracterización experimental se realiza mediante un único periodo de ensayo. En el presente apartado se muestran los datos complementarios que se registran en el ensayo que no se muestran en la memoria debido a su extensión. En la Figura C.15 y en la Figura C.16 se muestran las temperaturas registradas por las sonda de aire y de superficie en la sala de ensayos. La media de estas sondas se emplean para determinar la temperas empleadas en los modelos para representar el comportamiento de la celda.

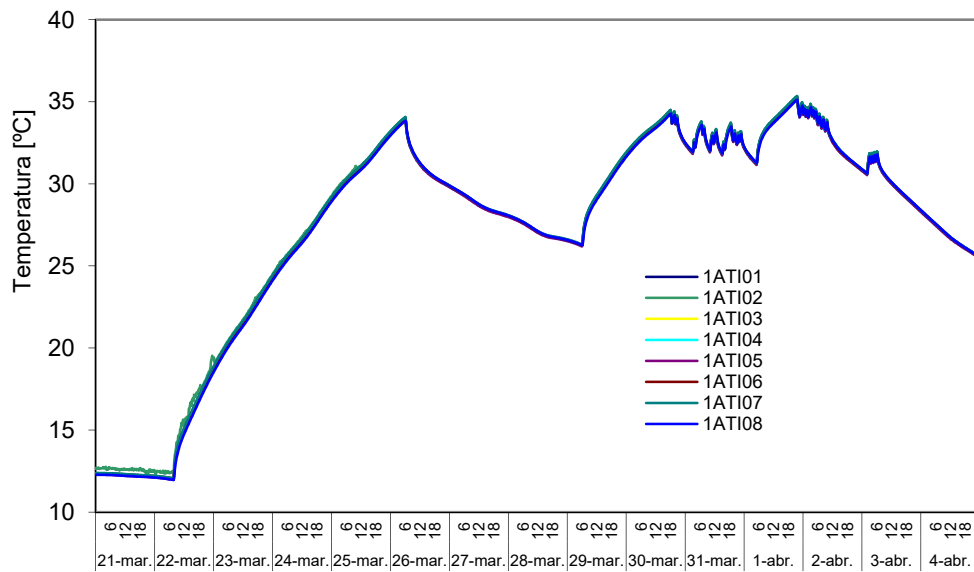


Figura C.15 – Temperaturas de aire en la sala de ensayo durante el ensayo del muro base con aislamiento

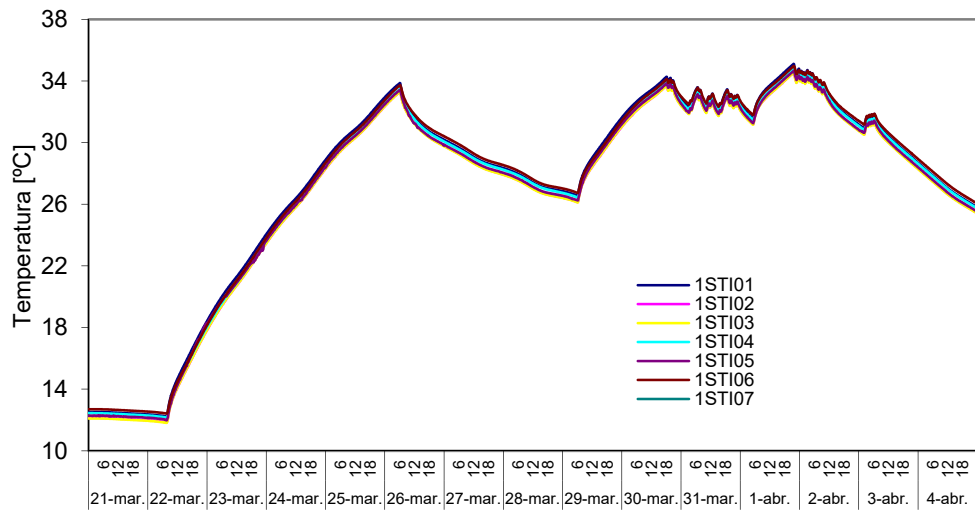


Figura C.16 – Temperaturas superficie envolvente celda durante el ensayo del muro base con aislamiento

En la Figura C.17 y Figura C.18 se muestran los flujos de calor que registra cada grupo de *tilas* de la envolvente de la sala de ensayos.

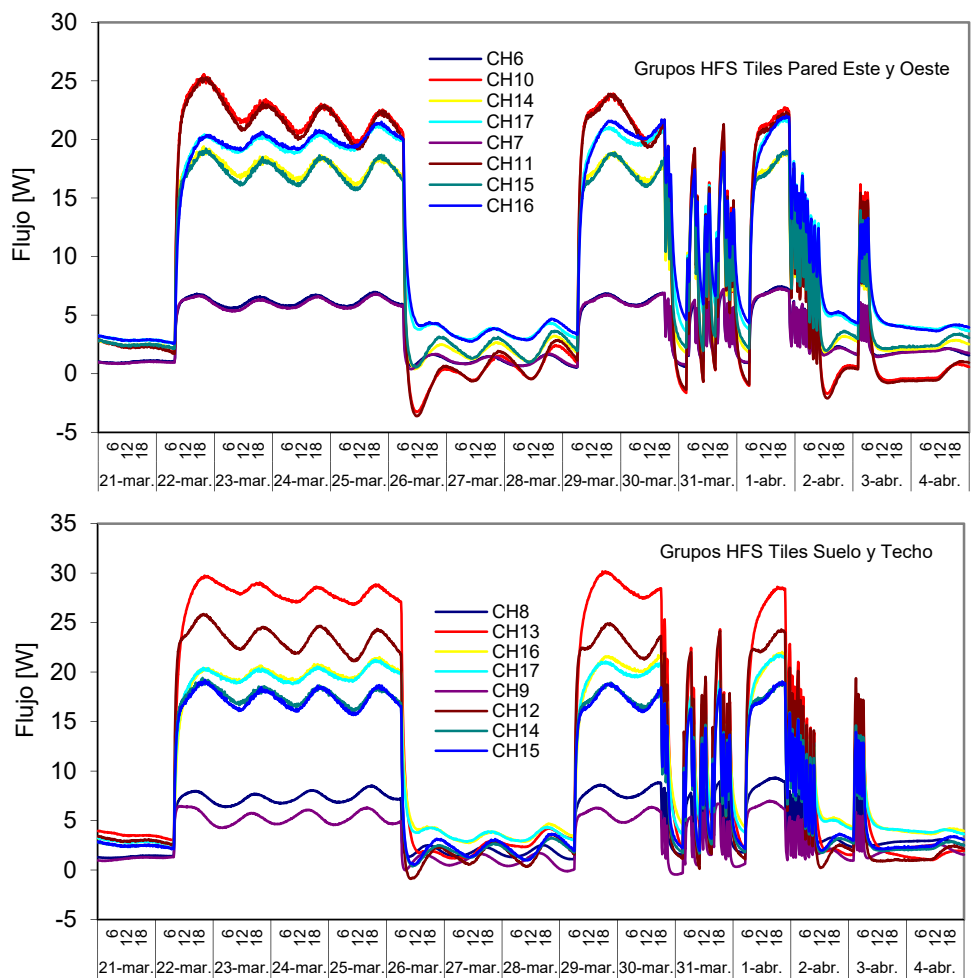


Figura C.17 – Flujos de calor medidos por grupos de *tilas* durante el ensayo del muro base con aislamiento

En la Figura C.18 y en la Figura C.19 se muestran las señales de los sensores de las multitiles situadas en los grupos de borde de referencia.

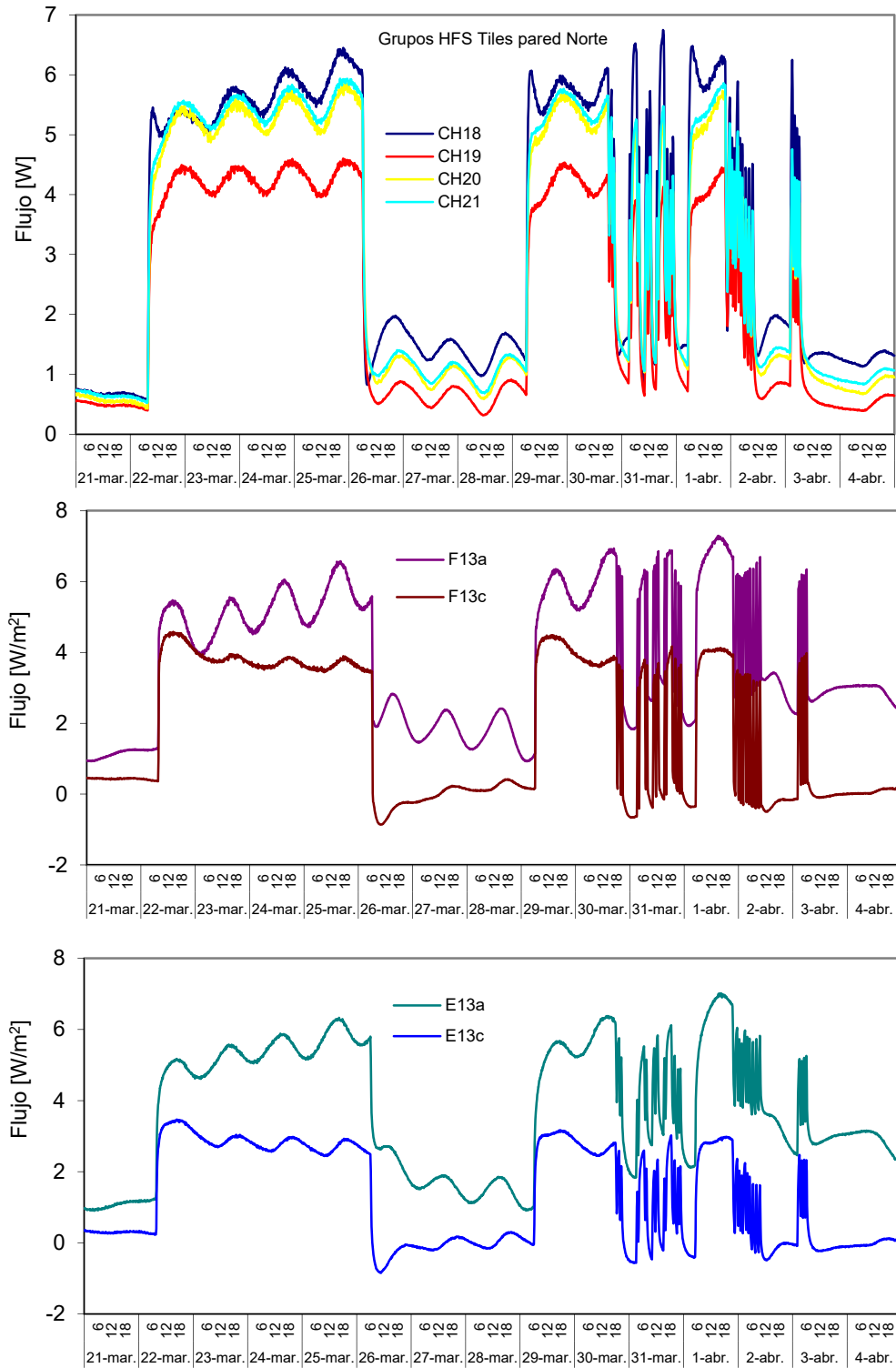


Figura C.18 – Flujos de calor medidos por las multitiles las durante el ensayo del muro base con aislamiento

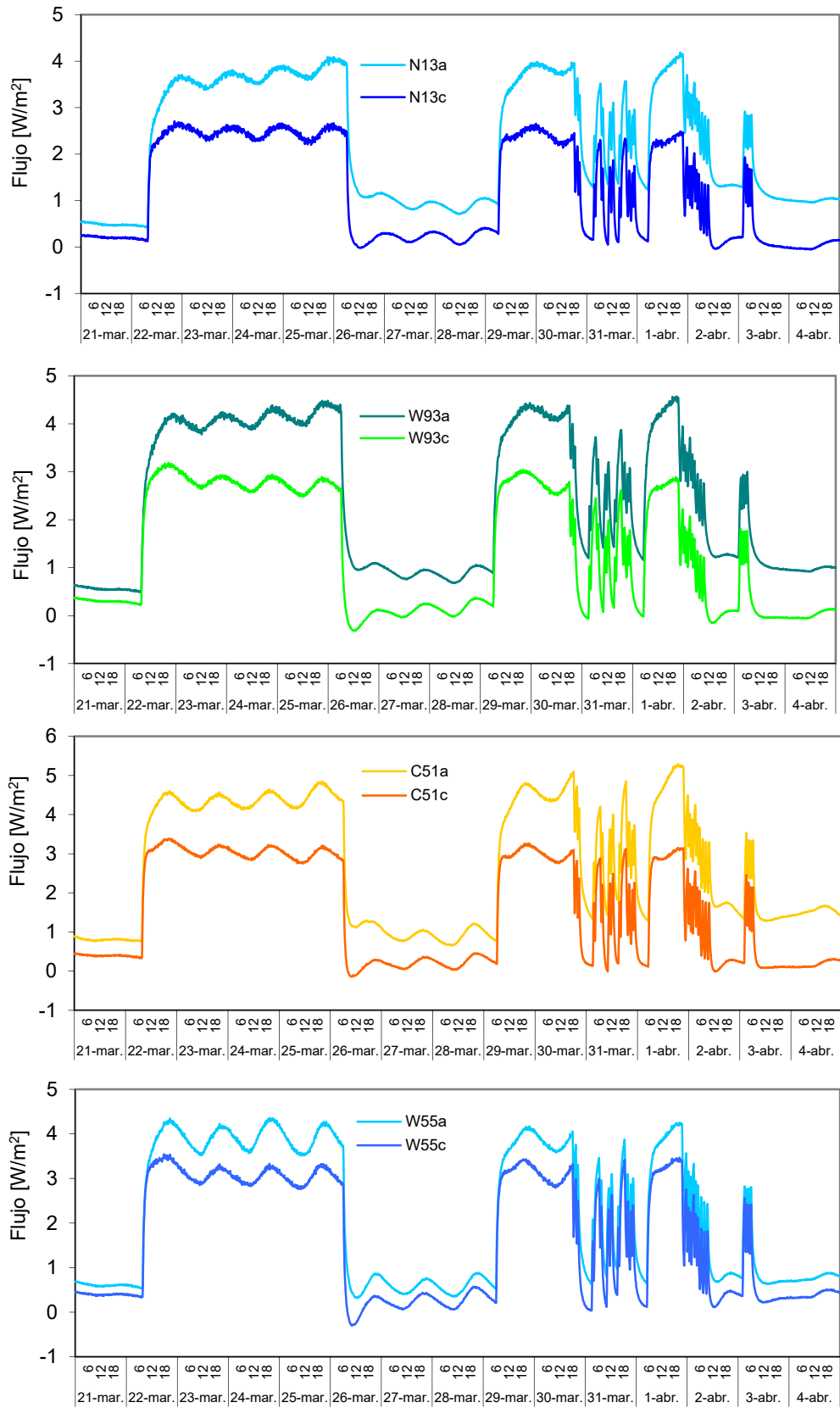


Figura C.19 – Flujos de calor medidos por las *multitiles* las durante el ensayo del muro base con aislamiento

En las Figuras C.20 y Figuras C.21 se muestran las lecturas de cada sonda de temperatura instalada en las diferentes capas de la muestra de muro base con aislamiento.

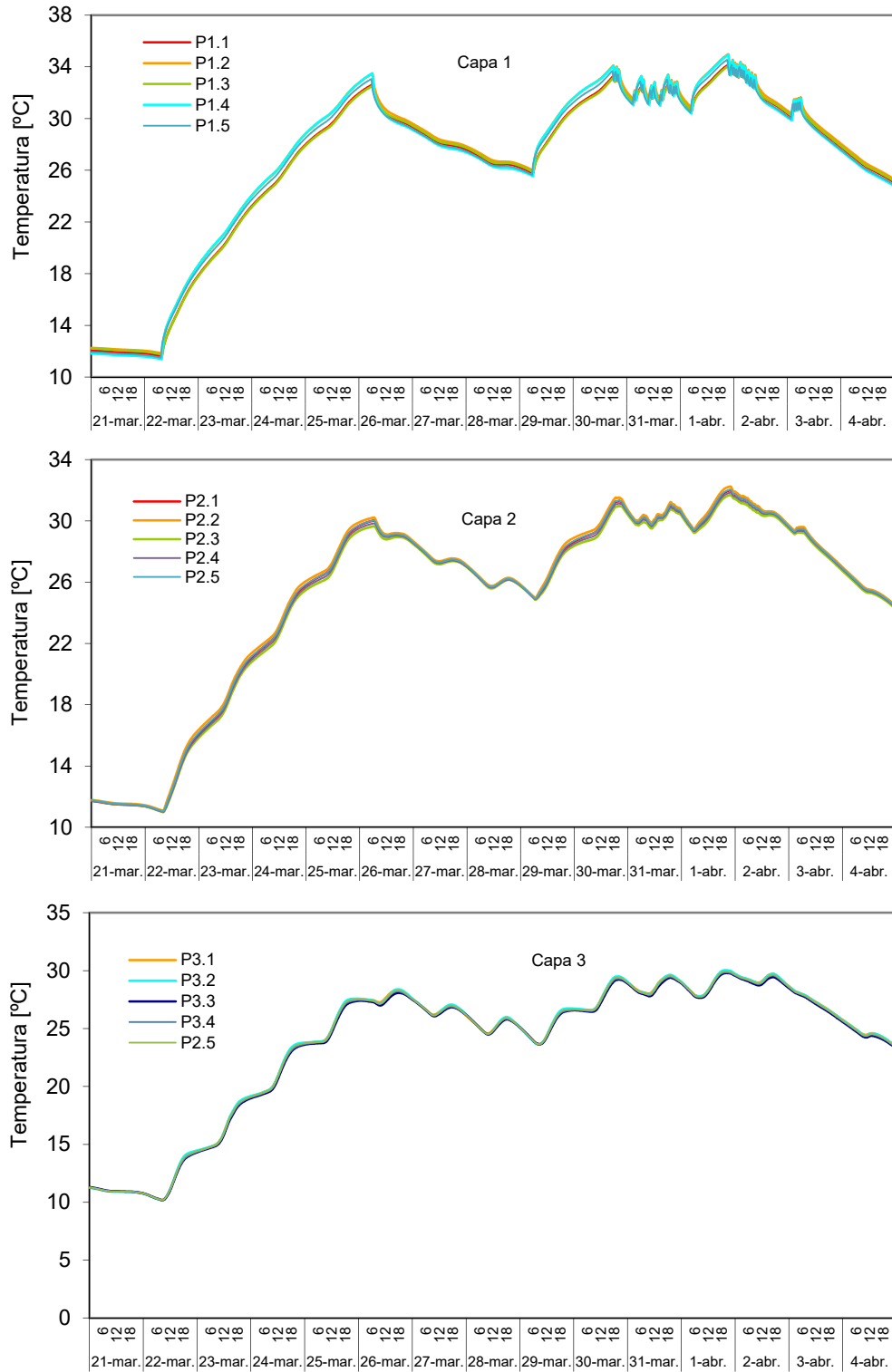


Figura C.20 – Temperaturas en cada capa durante el ensayo del muro base con aislamiento

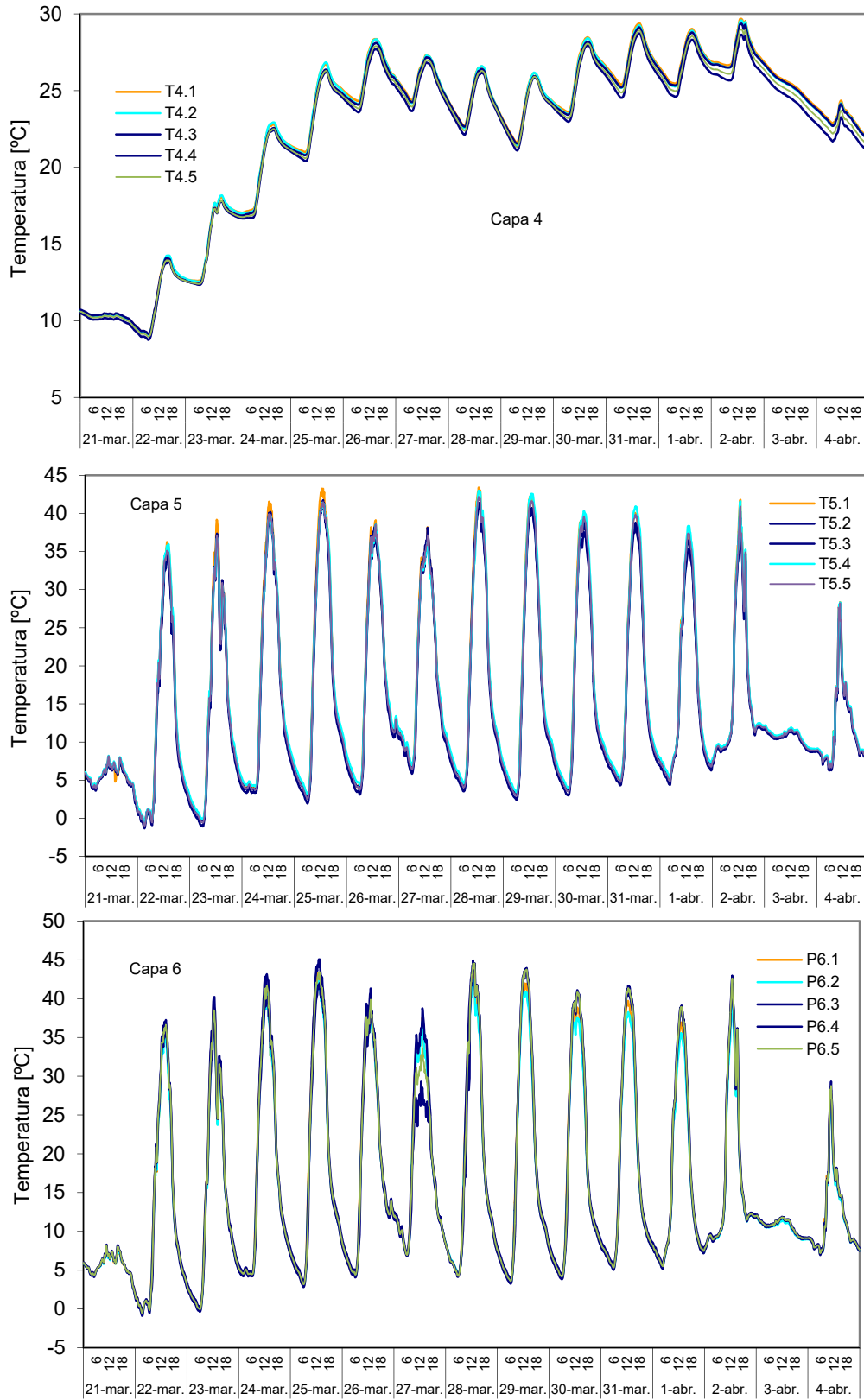


Figura C.21 – Temperaturas en cada capa durante el ensayo del muro base con aislamiento

C.3 Fachada ventilada ligera

En el caso de las probetas de fachada ventilada la caracterización experimental se complica. La componente activa de la cámara de aire ventilada implica un cambio en el proceso de transmisión de calor asociado a las condiciones del ambiente exterior. Por esta razón, se modifica la configuración de las sondas a colocar en la cámara de aire. La decisión del número, tipo y posición de dichas sondas es muy importante de cara a disponer de la información suficiente como para modelizar adecuadamente el comportamiento de la fachada. En este ámbito hay poca información disponible, por esa razón se han realizado simulaciones previas mediante modelos de CFD para determinar la posición idónea de cara a poder registrar los puntos más representativos de proceso de convección empleando la instrumentación mínima necesaria, ya que emplear muchas sondas complica el proceso de medida y adquisición y aumenta las probabilidades de fallos en el sistema. Por otro lado, se realizan dos periodos de ensayos, el primero se puede emplear para el proceso de modelado de los fenómenos de transmisión de calor en la cámara ventilada, y el segundo periodo como verificación de la validez de dichos modelos, y en su caso, reajustar las divergencias detectadas. Un ejemplo de esta aplicación de contraste se muestra en la Memoria para la fachada ventilada ligera. Además, se aumenta la cantidad de información disponible para futuros estudios en el ámbito de cámaras ventiladas. A continuación se indican la instrumentación empleada en la probeta y los datos correspondientes al periodo de contraste que no se recogen en el documento de la Memoria debido a su extensión.

C.3.1 Instrumentación de la muestra

En la Figura C.22 se muestra el esquema de capas que configuran la muestra de fachada ventilada ligera. Hasta la capa 4 la configuración es idéntica a la del muro base con aislamiento, ver Tabla C., y para el resto de capas nuevas, los esquemas de colocación de las sondas se muestran en la Figura C.23, en la Figura C.24 y en la Figura C.25.

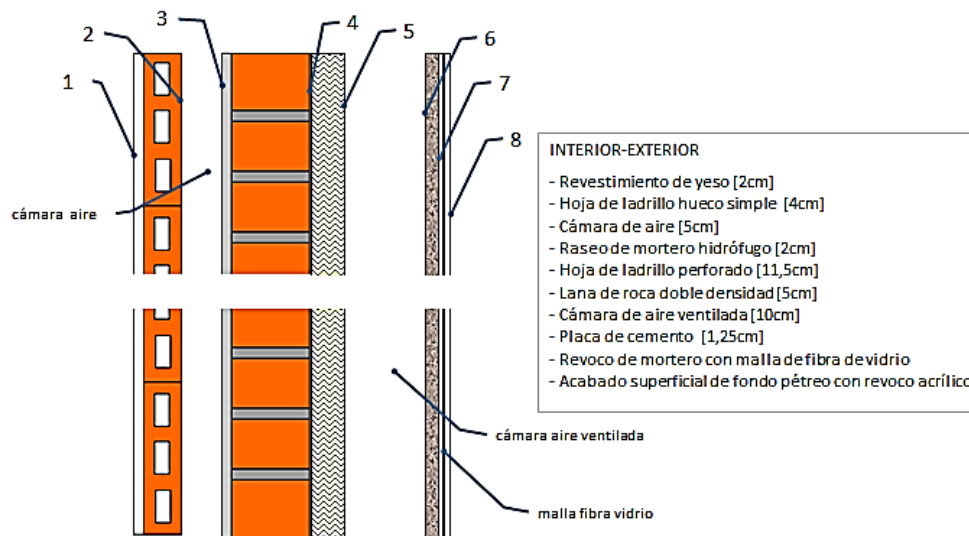


Figura C.22 – Solución constructiva de la fachada ventilada ligera

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES						
			CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5-6	CAPA 7	CAPA 8	CA
MURO BASE + FV L	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5		6		6	6
	Temperatura	Termopar tipo T			5		6		
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1		3			
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1							4

Tabla C.3 – Sensores instalados en la probeta de fachada ventilada ligera

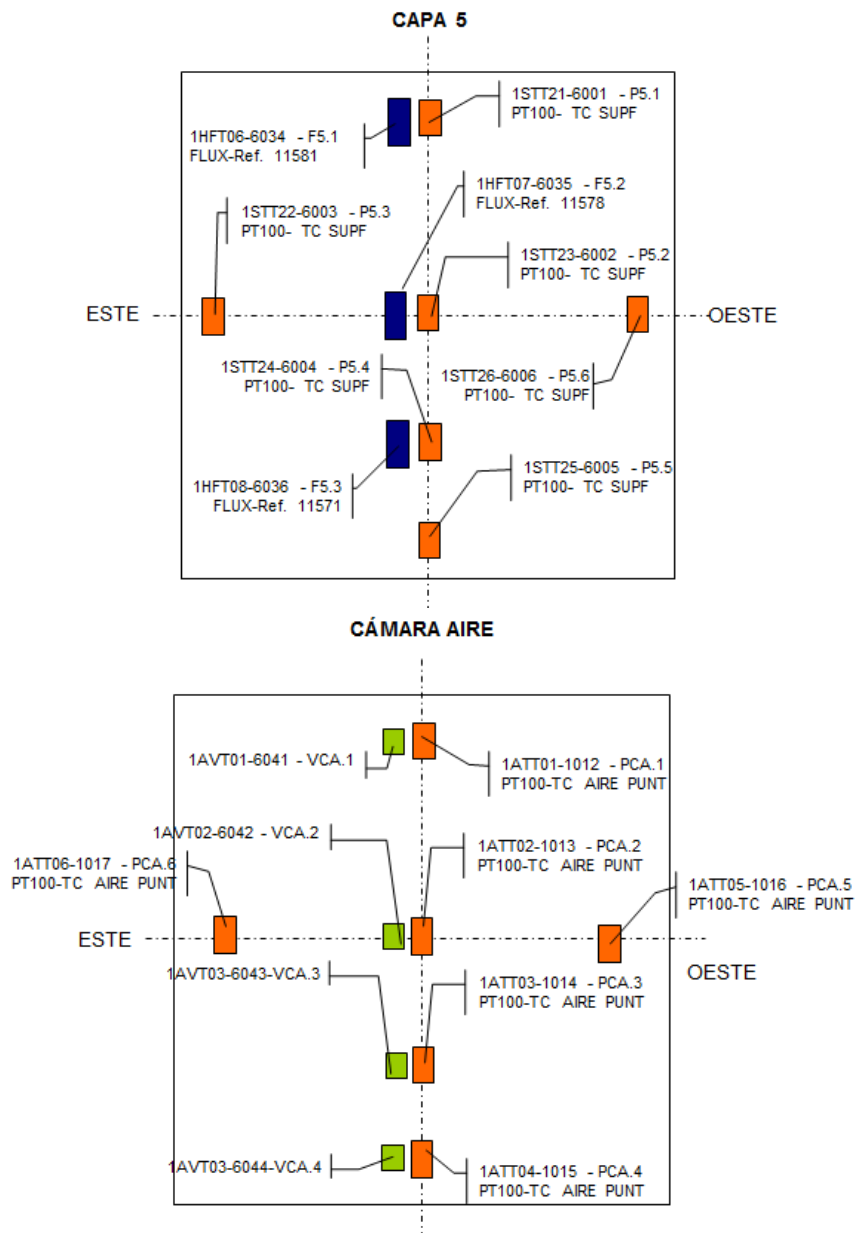


Figura C.23 – Esquema de montaje de las sondas en la muestra de fachada ventilada ligera

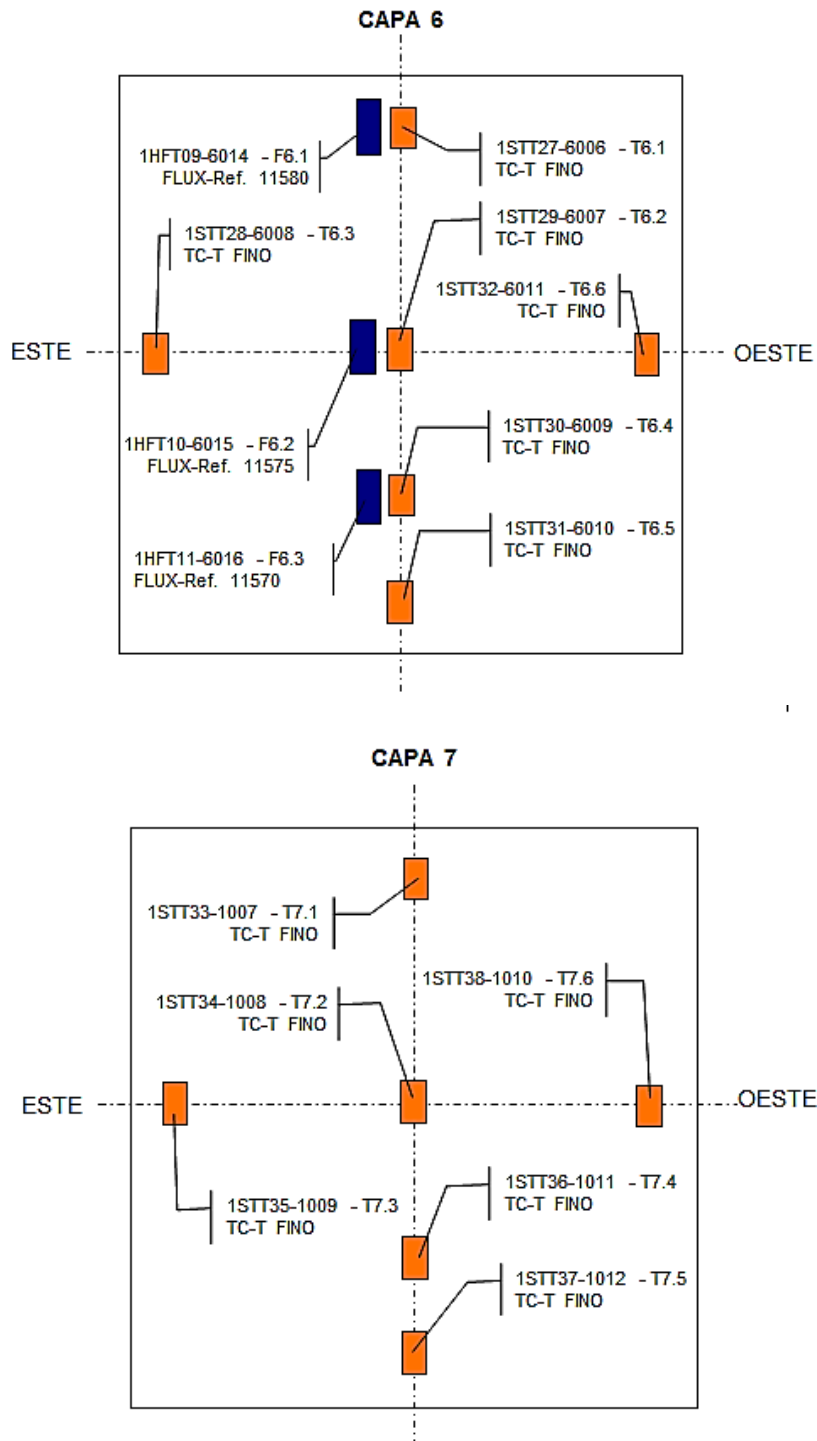


Figura C.24 – Esquema de montaje de las sondas en la muestra de fachada ventilada ligera

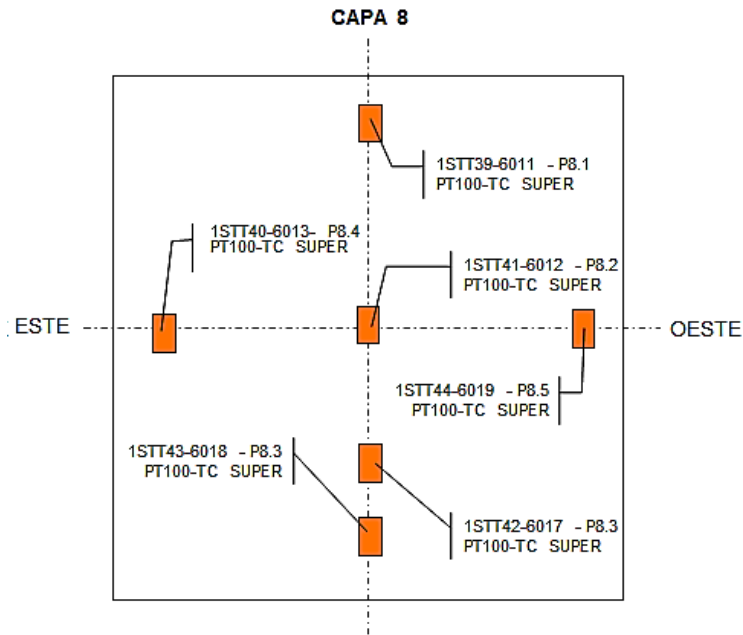


Figura C.25 – Esquema de montaje de las sondas en la muestra de fachada ventilada ligera

C.3.2 Datos experimentales ensayo de contraste

En la Figura C.26 y en la Figura C.27 se recogen los datos correspondientes a las condiciones ambientales durante el periodo de ensayo de contraste.

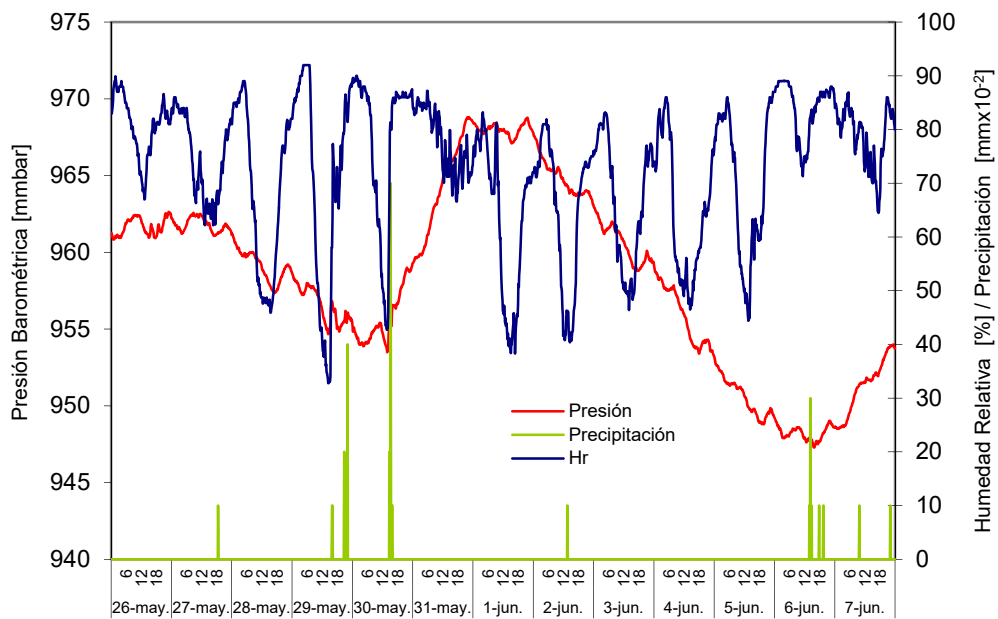


Figura C.26 – Condiciones ambientales en el ensayo de la fachada ventilada ligera periodo de contraste

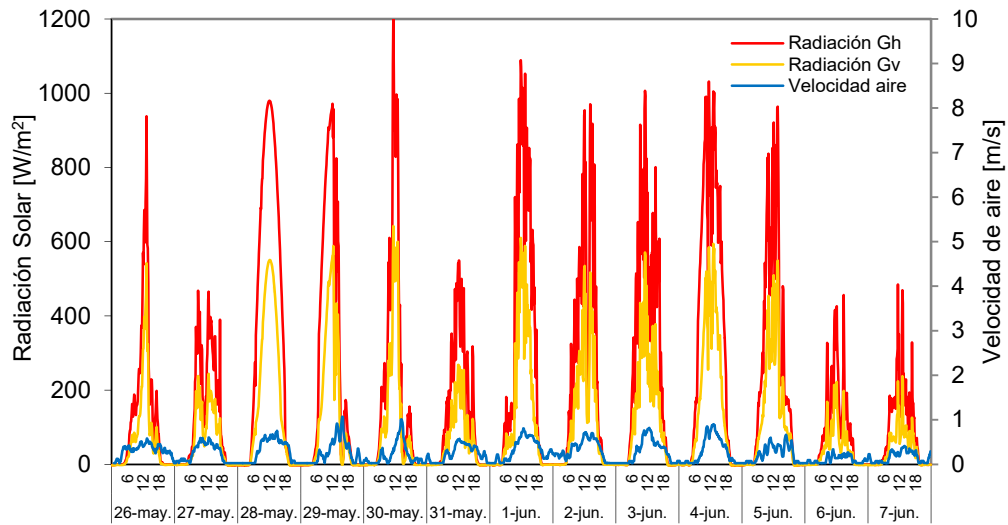


Figura C.27 – Radiación solar y velocidad de viento durante el ensayo de la fachada ventilada ligera

En la Figura C.28 se muestra la potencia inyectada en la sala de ensayo mediante la rutina de control y la evolución de las temperaturas interiores respecto a la temperatura de ambiente.

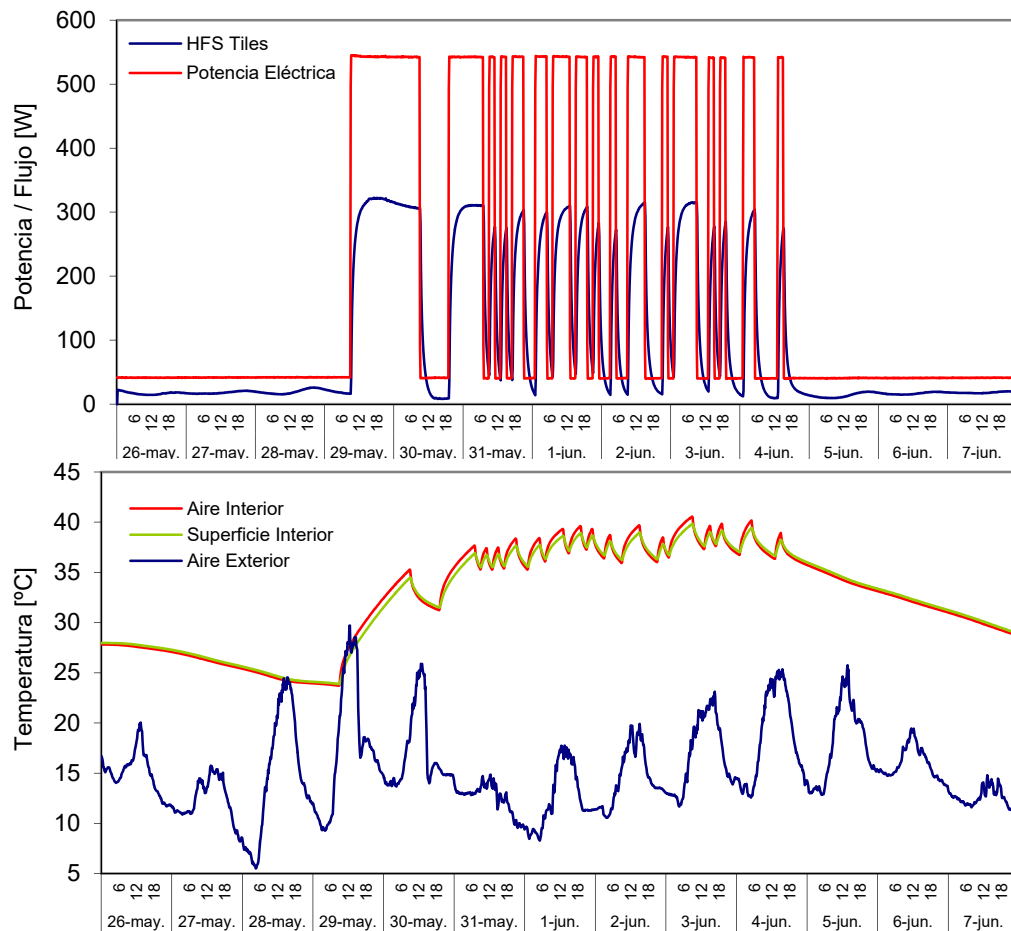


Figura C.28 – Condiciones de la sala de ensayo para la fachada ventilada ligera en el periodo de contraste

Para el periodo de contraste se modifica la rutina de ensayo, en este caso se aplica la rutina PRBS, de esta se dispone de más información sobre el comportamiento de la fachada ventilada, y si el modelo de convección es sensible al comportamiento en frecuencia de las excitaciones. En la Figura C.29 se verifica la homogeneidad de las temperaturas de aire y superficie interior de la sala de ensayos para el periodo de contraste, así como el cálculo del salto medio de temperaturas entre ambientes.

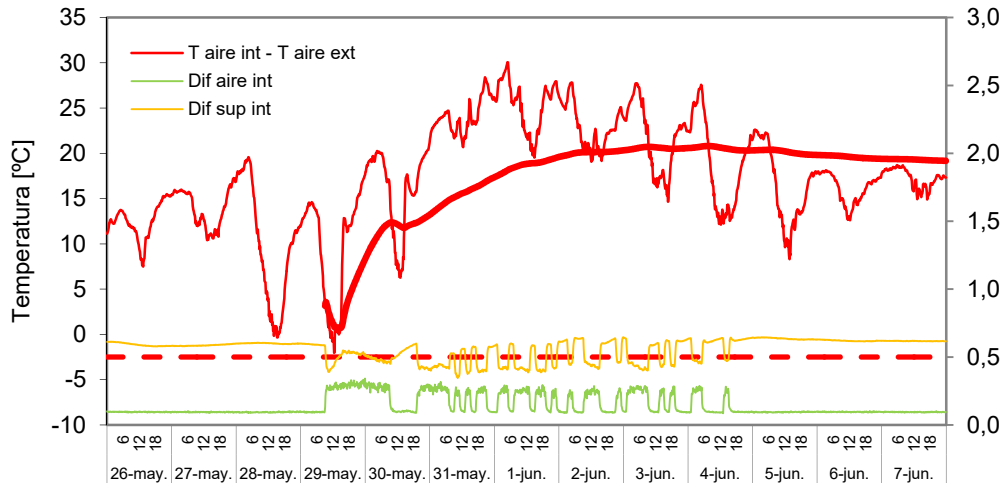


Figura C.29– Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada ligera en el periodo de contraste

En la Figura C.30 se muestran las temperaturas medias en cada una de las capas de la probeta.

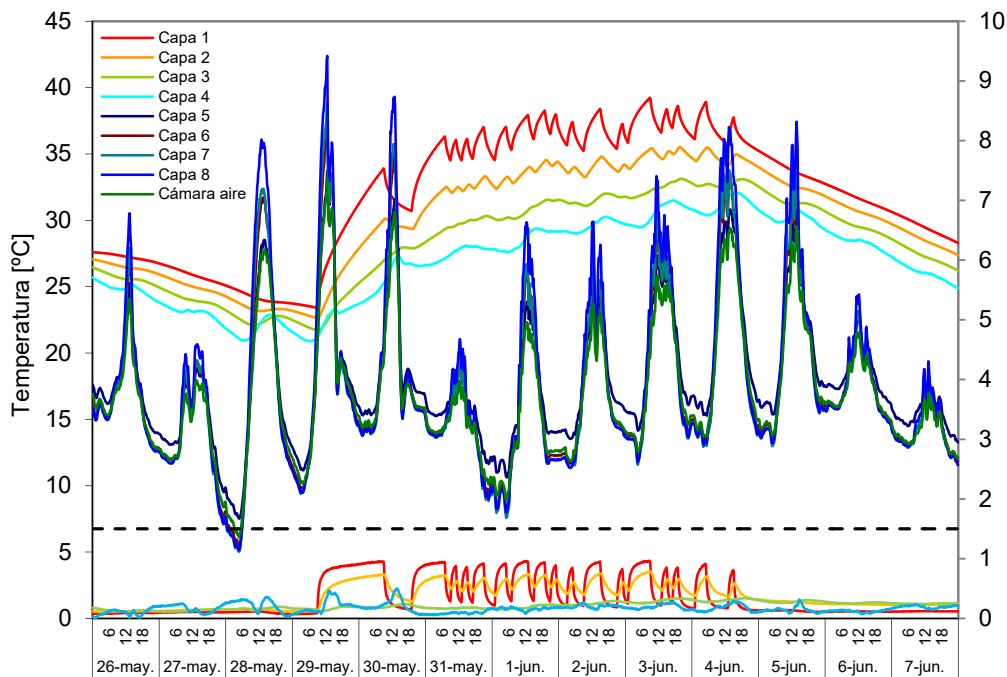


Figura C.30– Temperaturas en la probeta de fachada ventilada ligera

En la Figura C.31 se muestran los flujos puntuales medidos por las fluxímetros colocados en el punto central en las capas de mayor interés de la probeta de fachada ligera. Y en la Figura C.32 se muestran la comparativa de flujos medidos en la superficie interior de la muestra para dicho punto central respecto a flujo medido en las zonas de borde de la probeta. Esta comparativa permite evaluar el efecto de dichas zonas.

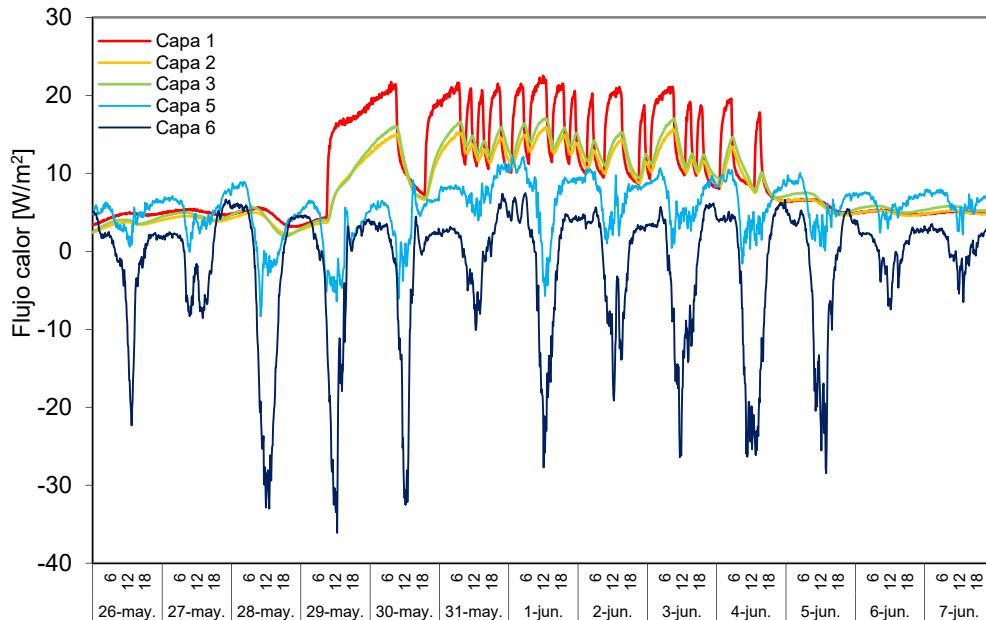


Figura C.31– Flujos de calor puntuales medidos en la zona central de la fachada ventilada ligera para cada una de las capas más representativas durante el periodo de contraste

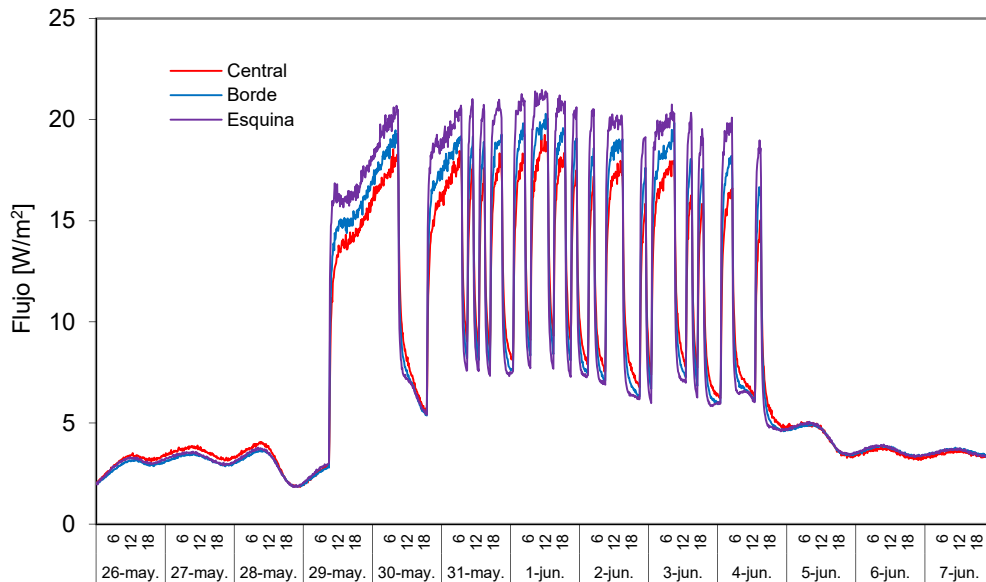


Figura C.32– Flujos superficiales en la cara interior, capa 1, para la muestra de fachada ventilada ligera

En la Figura C.24 se muestra la evolución de temperaturas en altura para la cámara de aire y las superficies que la conforman.

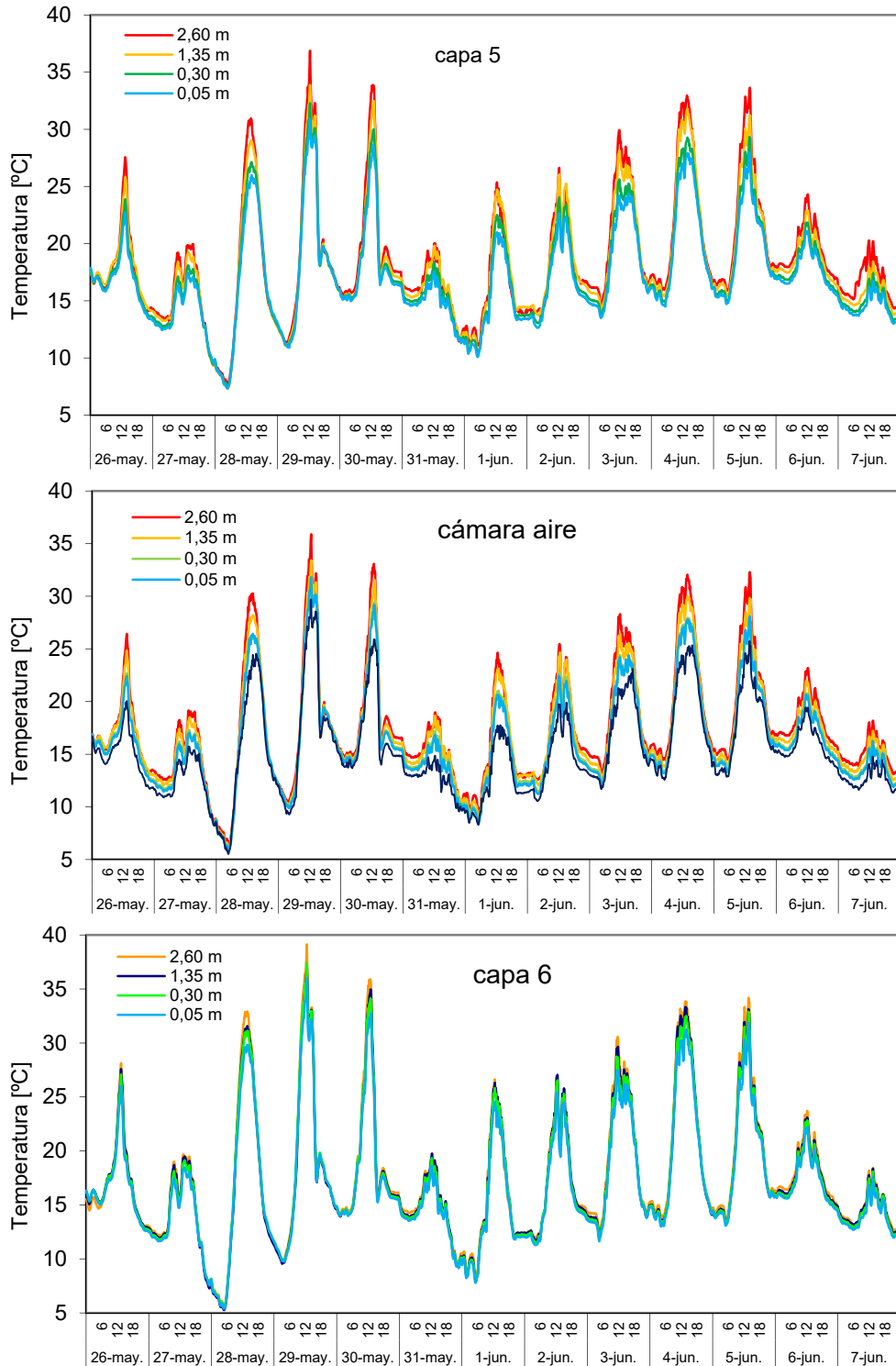


Figura C.24 – Temperaturas en función de la altura en el eje central de la cámara ventilada

En la Figura C.26 se muestra la velocidad de aire medida en la cámara ventilada por los termoanemómetros en función de la altura. En la Figura C.27 se muestran los flujos intercambiados por las superficies que conforman la cámara de aire registrados por los fluxímetros instalados.

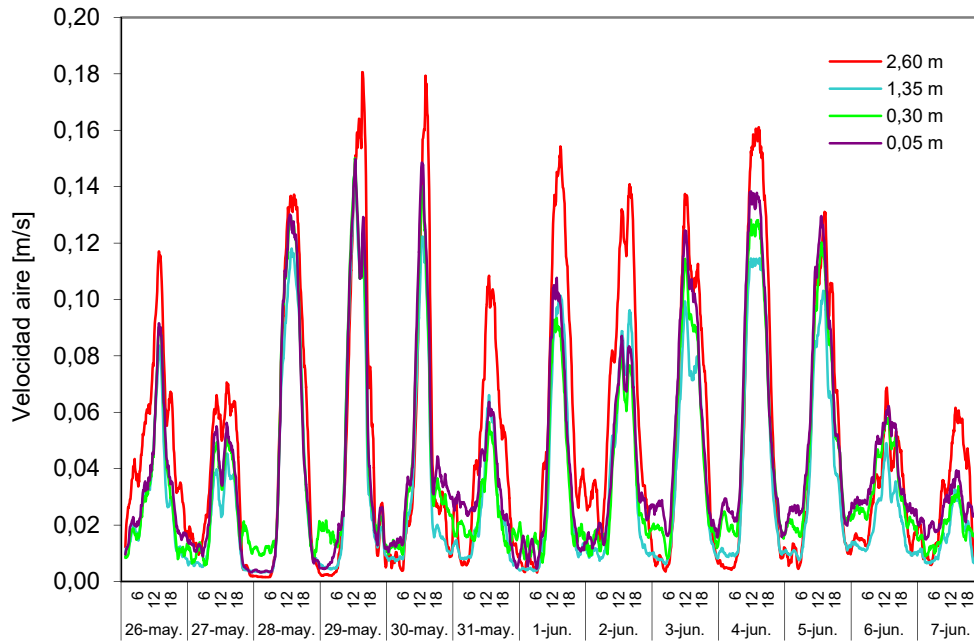


Figura c.25 – Velocidades de aire en la cámara ventilada para el eje central en función de la altura

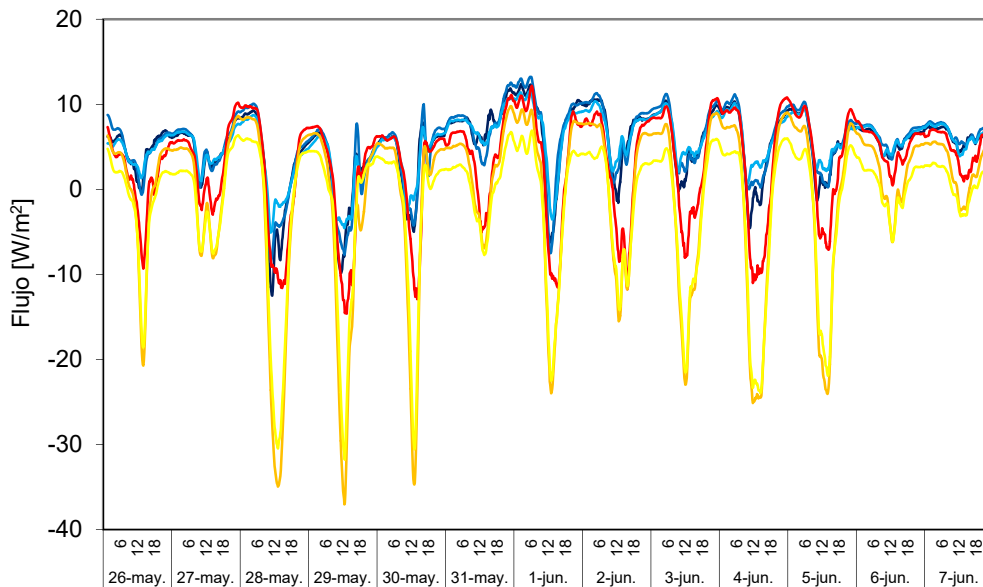


Figura c.26 – Flujos de calor puntuales medidos en las superficies que conforman la cámara ventilada para el eje central en función de la altura

C.4 Fachada ventilada pesada

De la experiencia adquirida mediante el ensayo de la probeta de fachada ventilada ligera se plantean modificaciones sobre la instrumentación instalada en la muestra de fachada pesada. Un claro ejemplo es el empleo de sondas de medida de diferencia de presión, de cara a caracterizar las pérdidas de carga en las zonas de entrada y salida de la cámara ventilada. Esta variable se ha mostrado de gran necesidad a la hora de ajustar los modelos CFD. Así mismo, se añade al grupo de sondas una termopila para medir con mayor precisión el salto de temperaturas que se produce dentro de la cámara de aire, junto con la medida de la homogeneidad de dicho salto a lo largo de la toda la muestra, lo que permite valorar la fiabilidad de la hipótesis de flujo bidimensional dentro de la probeta. A continuación se muestran los esquemas de instrumentación instalados en la probeta y los datos correspondientes al periodo de contraste realizado.

C.4.1 Instrumentación de la muestra

En la Figura C.27 se muestra un esquema constructivo de la probeta de fachada ventilada pesada con la descripción de cada capa que la conforma. En la Tabla C.4 se recoge el número y tipología de sensores instalados.

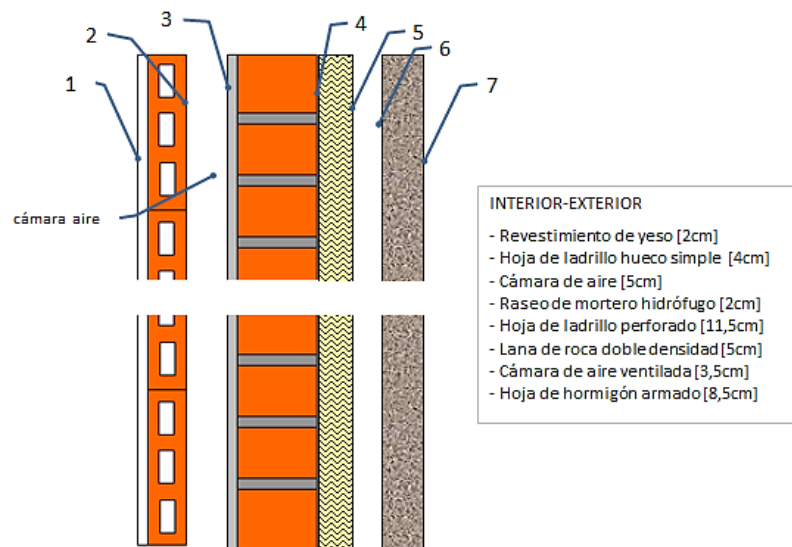


Figura C.27 – Solución constructiva de la fachada ventilada pesada

MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES						
		CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5-6	CA	CAPA 7	
MURO BASE + FV P	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5		6	10	5
	Temperatura	Termopila tipo T			5			
	Dif Temperatura	Temopila tipo T 10 puntas					1	
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1				
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1					4	
	Dif Presión	Ahlborn FD8612DPS/APS					3	

Tabla c.4 – Sensores instalados en la probeta de la fachada ventilada pesada

En la Figura C.28 y en la Figura C.29 se muestran los esquemas de montaje de los sensores para las capas nuevas asociadas a la probeta de fachada ventilada pesada.

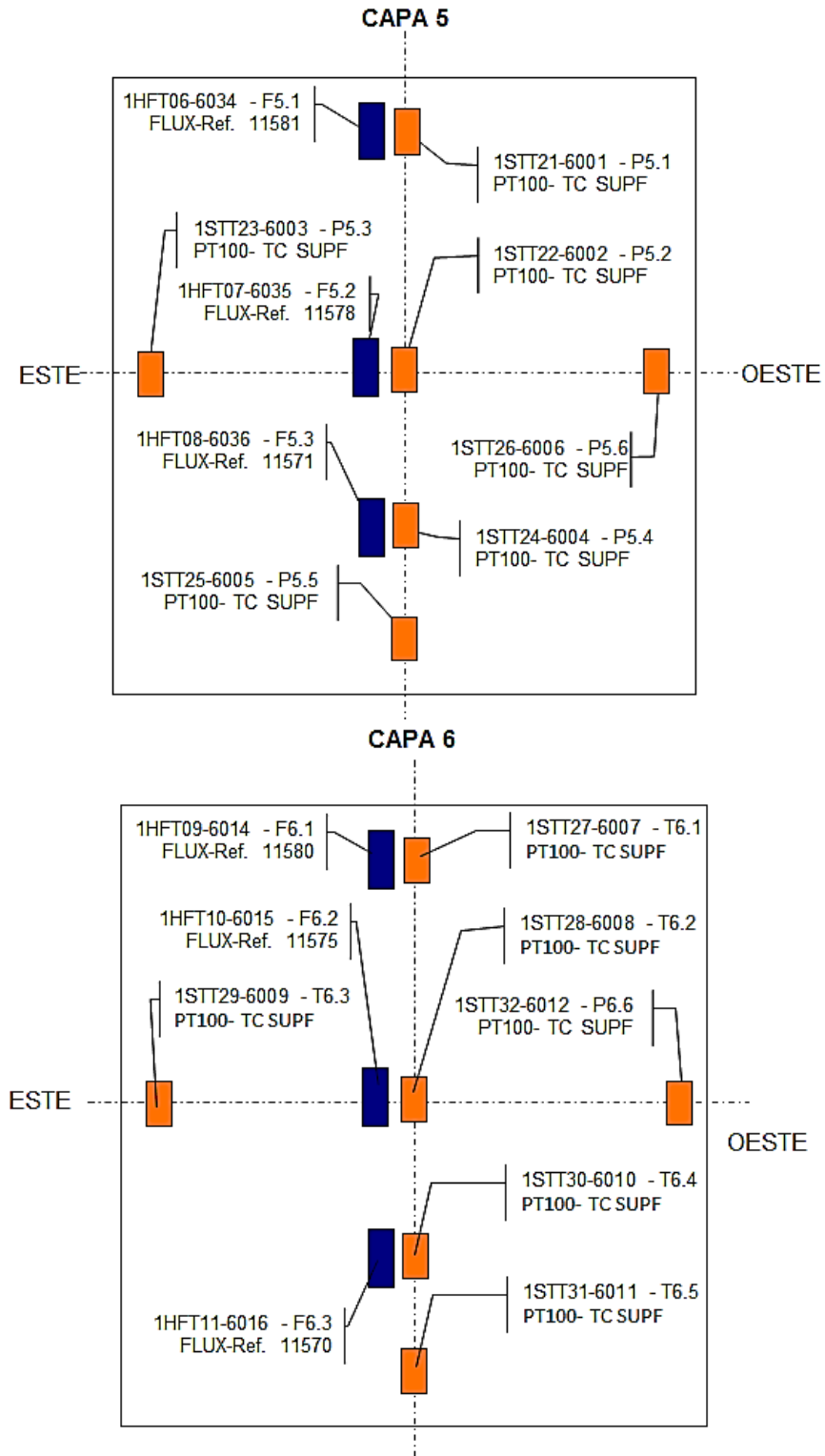


Figura C.28 – Instrumentación instalada en la fachada ventilada pesada

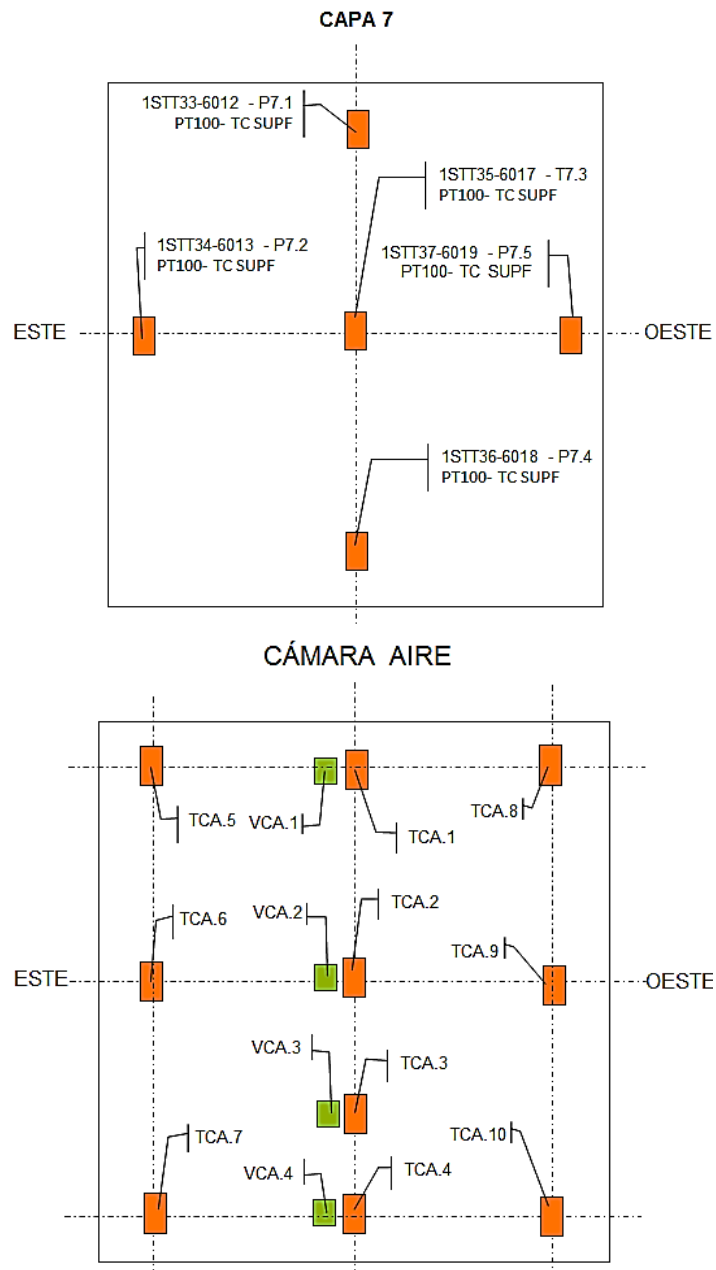


Figura C.29 – Instrumentación instalada en la fachada ventilada pesada

En el esquema correspondiente a las sondas de la cámara de aire mostrado en la imagen inferior de la Figura C.29 no se ha definido la nomenclatura total de la instrumentación ya que la imagen sería compleja de visualizar, por tanto, se ha indicado la definición propia del ensayo que se emplea en el posterior análisis específico de datos. En la Figura C.30 se muestra el esquema de montaje de la termopila y de las tres sondas de presión diferencial aprovechando el montaje de manguitos de presión instalados para medir la pérdida de presión en la entrada y en la salida respecto al exterior. El montaje de manguitos se realiza de esta forma ya que los sensores empleados son de presión diferencial, lo que permite ampliar la precisión respecto a la medida de las presiones absolutas y la resta posterior.

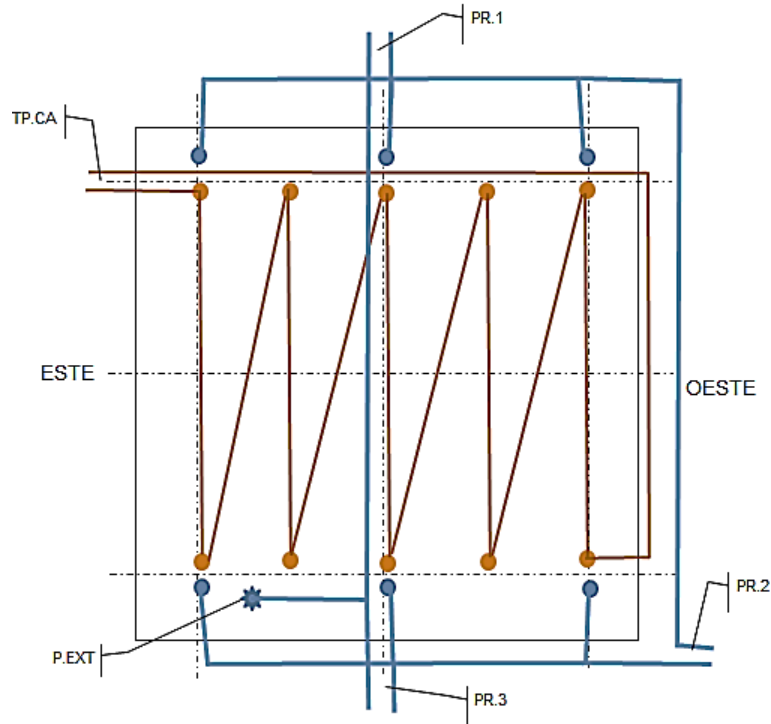


Figura C.30 – Montaje termopila y manguitos de presión en la probeta de fachada ventilada pesada

C.4.2 Datos experimentales ensayo de contraste

En la Figura C.31 y en la Figura C.32 se muestran las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolla el periodo de ensayo que se emplea como contraste para el modelado de la muestra de fachada ventilada pesada.

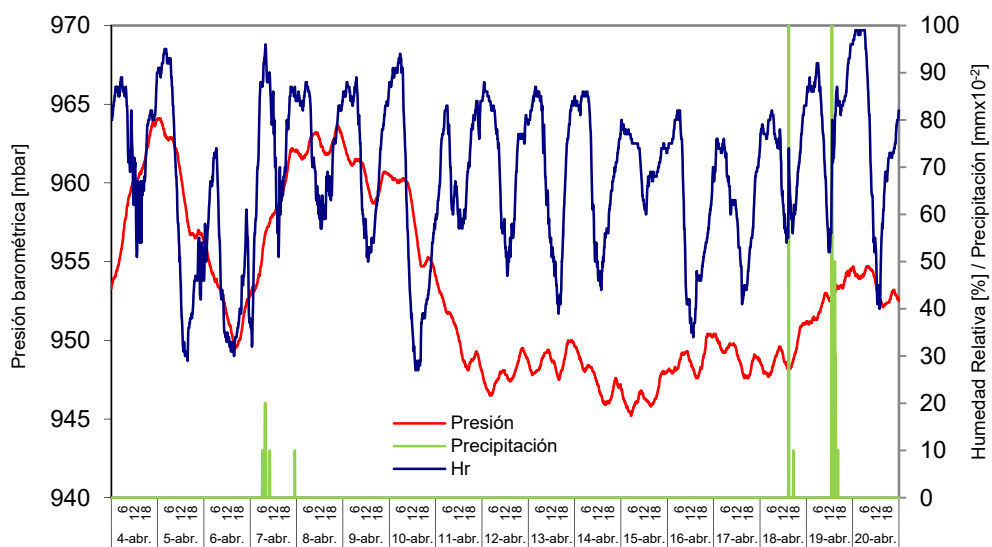


Figura C.31 – Condiciones ambientales ensayo de fachada ventilada pesada durante periodo de contraste

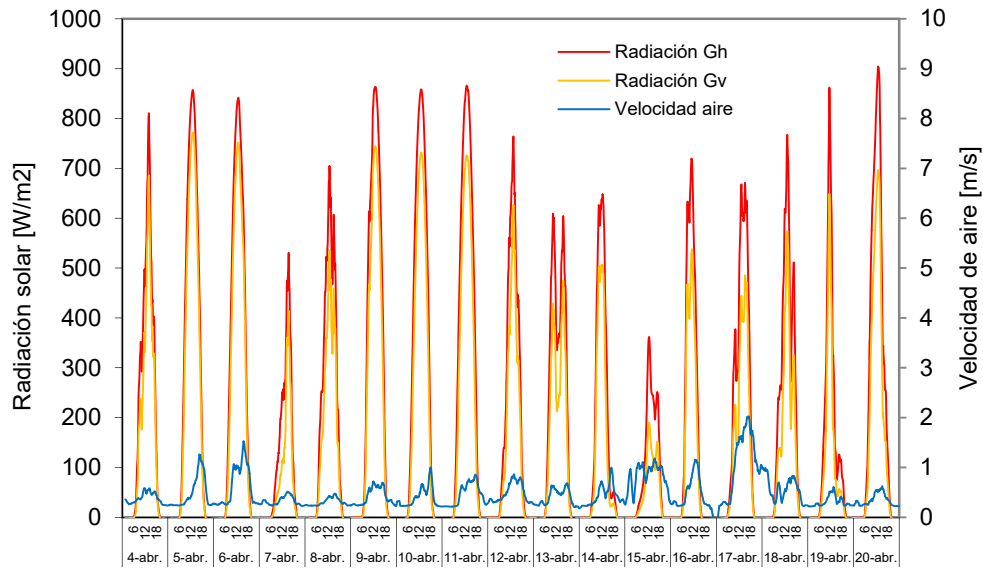


Figura C.32 – Radiación solar y velocidad de viento durante ensayo de contraste fachada ventilada pesada

En la Figura C.33 se muestra la rutina de ensayo y el flujo de calor intercambiado por la envolvente. En este caso no se aplica una de las rutinas de ensayo estándar sino que se emplea una excitación escalón. Este cambio se realiza debido a la elevada inercia de la muestra, y se busca el estudio de la respuesta a escalón. Se aprecian dos picos singulares en la señal de flujo de calor para los días 14 y 16 de abril. Esto se debe a que, por razones ajenas al estudio, se entró en la sala de ensayos.

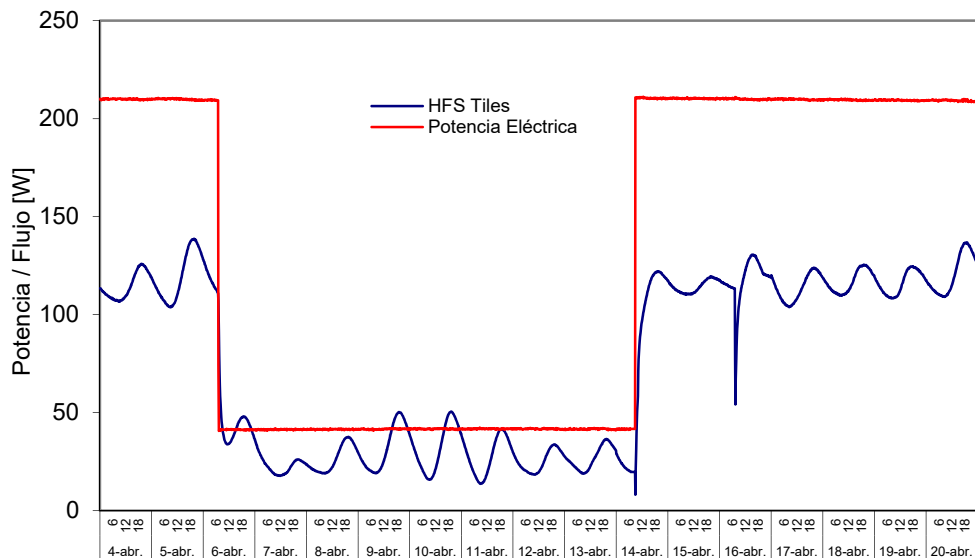


Figura C.33 – Potencia introducida y flujo de calor de la envolvente de la sala de ensayos para la fachada ventilada pesada

En la Figura C.34 y en la Figura C.35 se analizan las condiciones de temperatura de la sala de ensayos. Y en la Figura C.36 se muestra la temperatura media de cada capa junto con las diferencias máximas en las capas interiores del muro base.

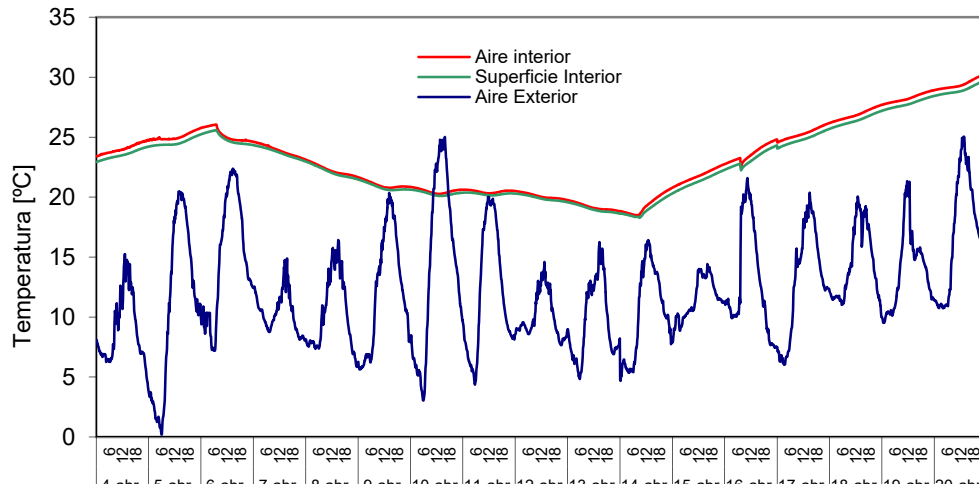


Figura C.34 – Temperatura de la sala de ensayos y ambiental para la fachada ventilada pesada

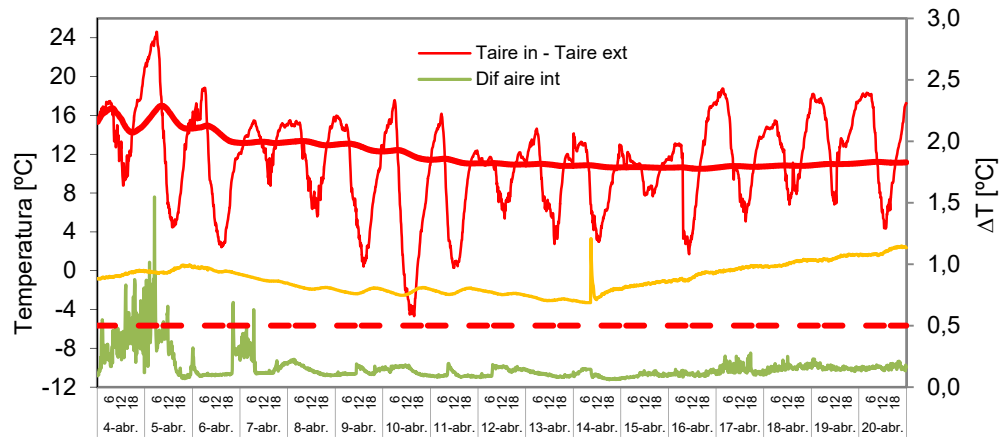


Figura C.35 – Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada pesada

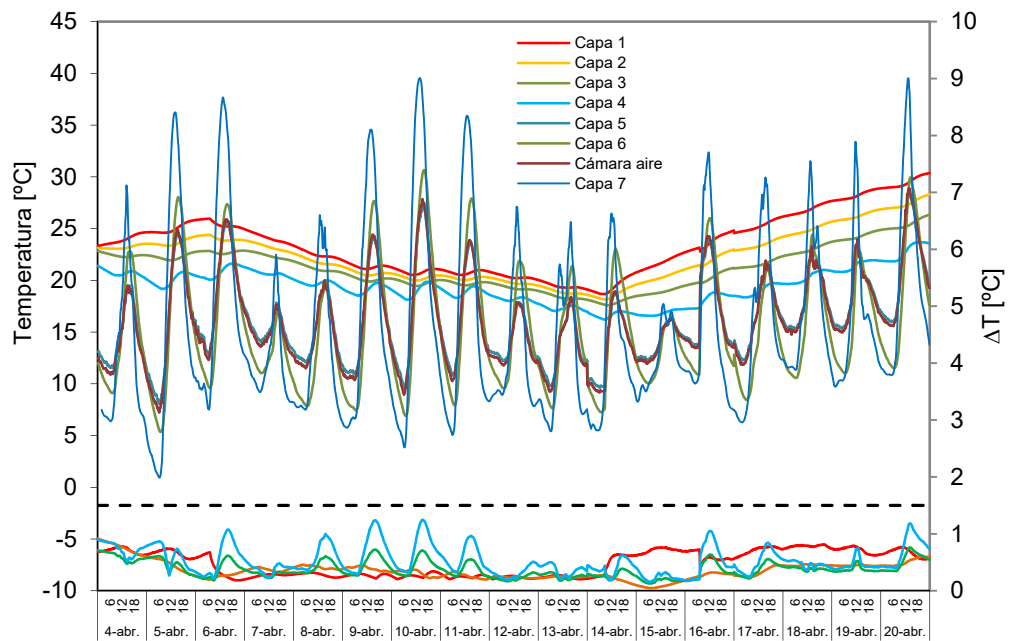


Figura C.36 – Temperaturas en la probeta de fachada ventilada pesada

Una vez analizadas las condiciones de temperatura, se evalúan los flujos de calor en la probeta. En la Figura C.37 se muestran los flujos en las capas interiores del muro de doble hoja. Y en la Figura C.38 la homogeneidad de flujos en la superficie interior de la muestra.

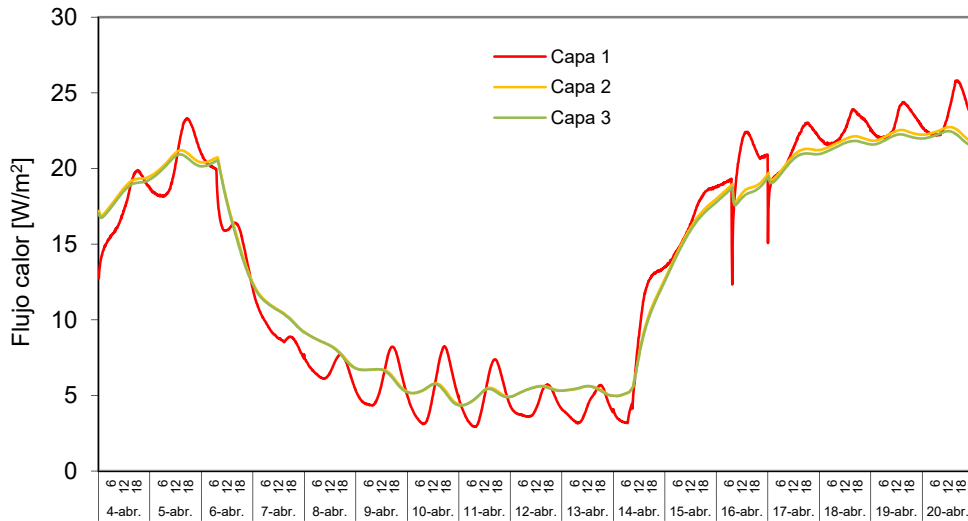


Figura C.37 – Flujos de calor puntuales medidos en la zona central del muro base en la probeta de fachada ventilada pesada

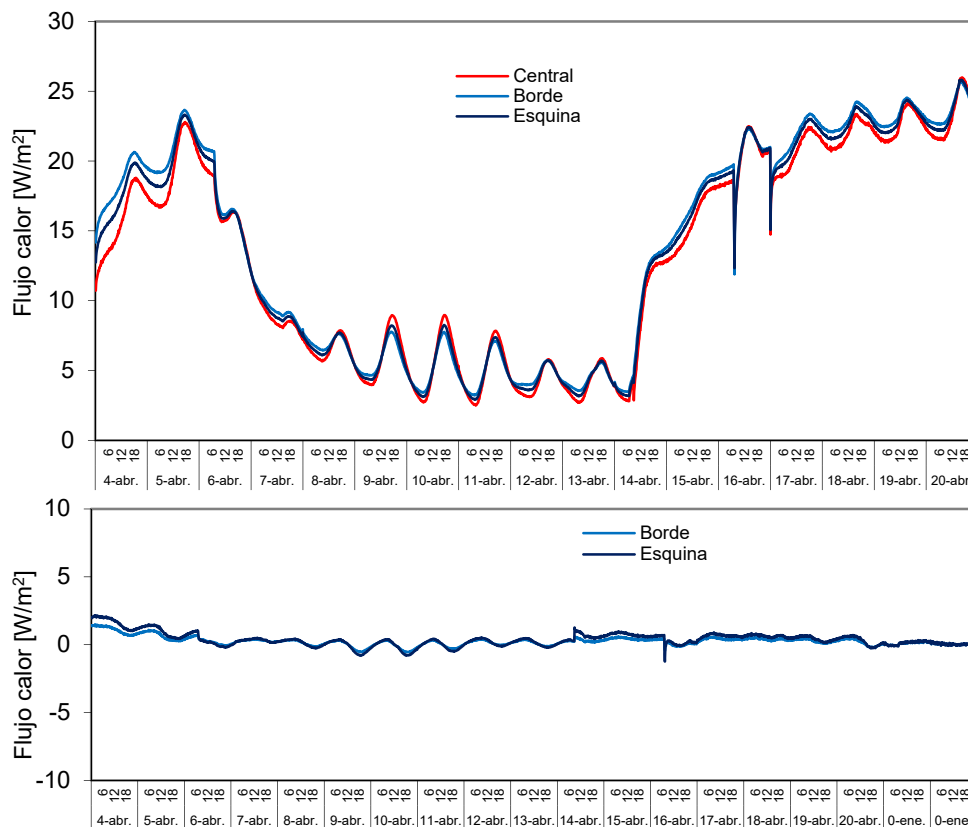


Figura C.38 – Flujos superficiales en la cara interior, capa 1, para la muestra de fachada ventilada pesada

En la Figura C.39 se muestra la evolución de las temperaturas en función de la altura en las superficies y en el aire de la cámara ventilada.

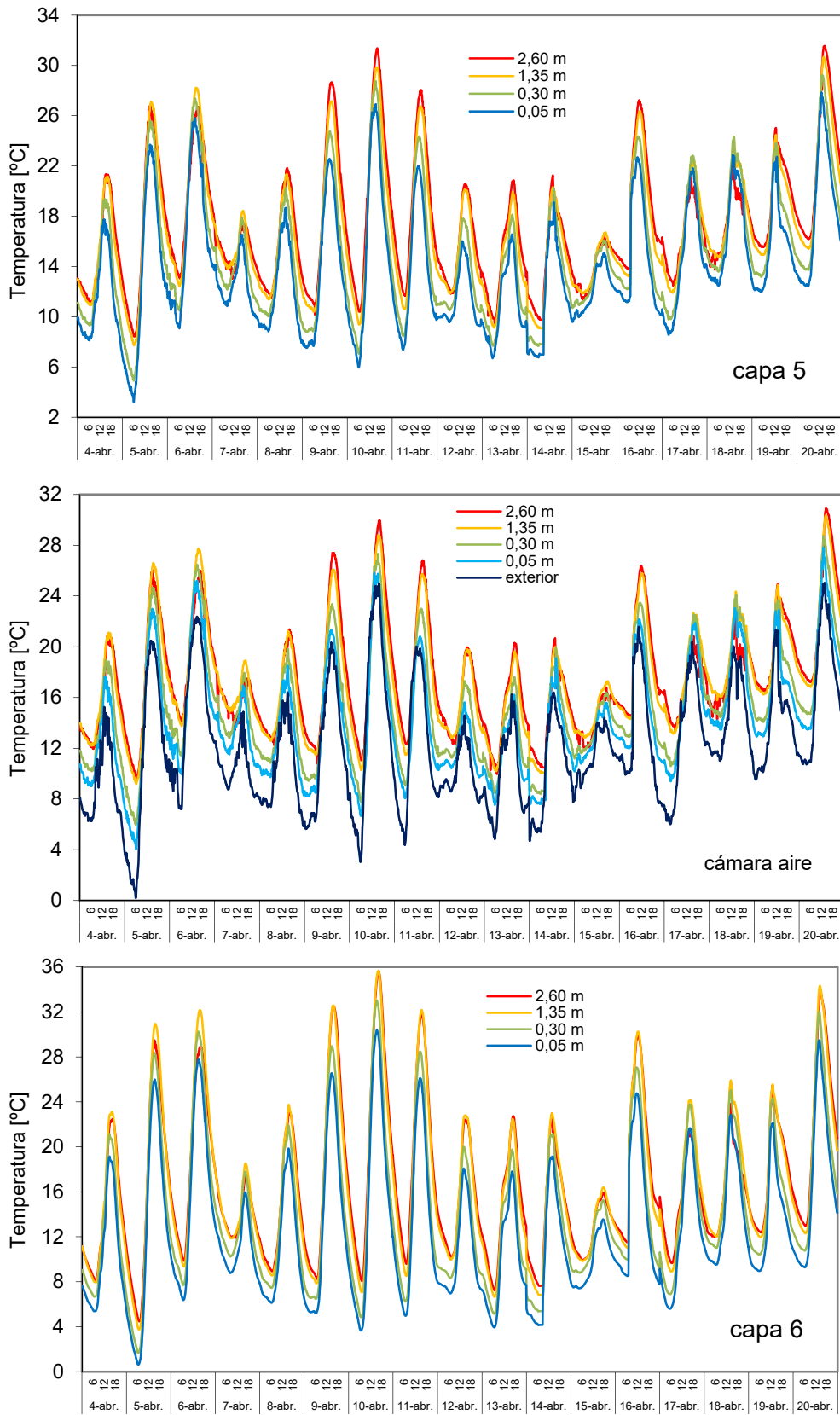


Figura C.39 –Temperatura en altura en el eje central de la cámara ventilada probeta de fachada pesada

En la Figura C.40 se muestra la comparativa entre el salto de temperatura que experimental el aire dentro de la cámara ventilada registrado por la termopila respecto a la diferencia entre las sondas de temperatura de aire instaladas en el eje central.

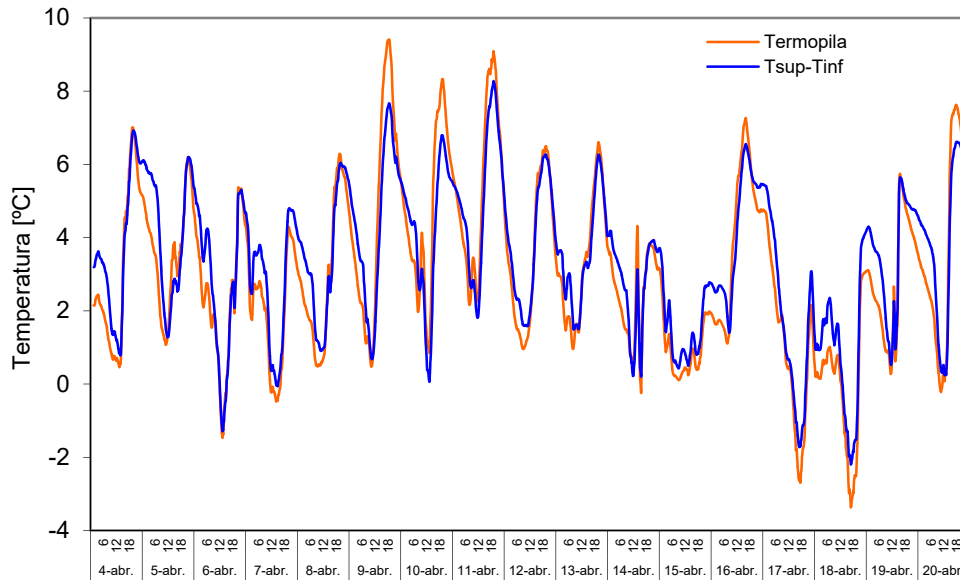


Figura C.40 – Salto de temperatura en la cámara de aire ventilada medido por la termopila y por las sondas instaladas en el eje central de la muestra

En la Figura C.41 se muestran las lecturas de velocidad del aire dentro de la cámara ventilada en función de la altura.

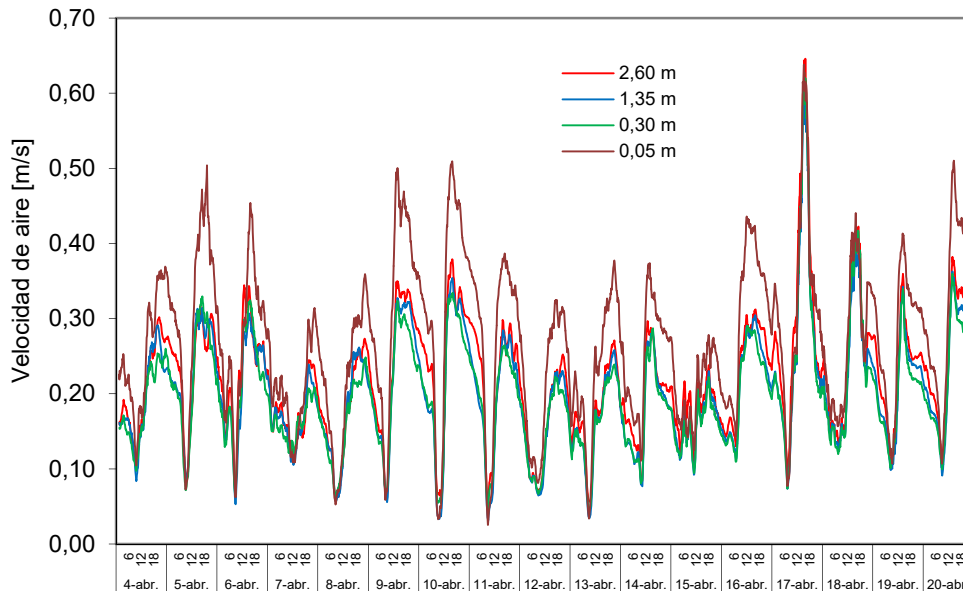


Figura C.41 – Velocidades de aire cámara ventilada para el eje central en altura para la fachada pesada

En la Figura C.42 se muestran las señales de presión diferencias que se producen en la entrada y salida de la cámara ventilada en comparación con la velocidad de viento que se produce en el exterior.

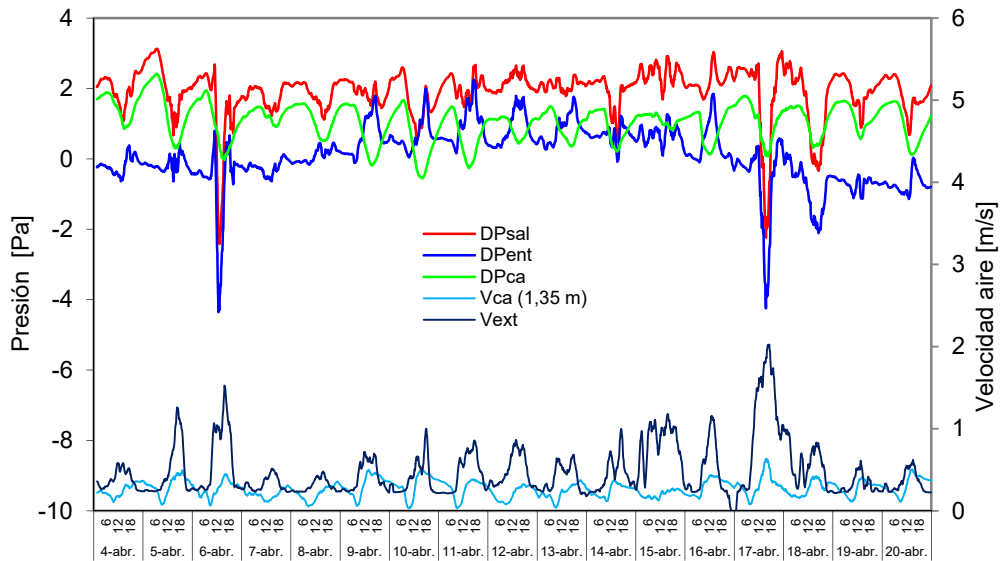


Figura C.42– Caída de presión en la fachada pesada y velocidades de aire exterior y de aire dentro de la cámara ventilada

C.5 Fachada ventilada forzada

En este caso, las propiedades de la fachada son totalmente diferentes a las de las fachadas analizadas previamente. Por un lado la construcción es ligera y de carácter industrializable, frente a la construcción más convencional de las anteriores. Y por otro lado, al forzar el movimiento de aire dentro de la cámara ventilada se obtiene un comportamiento desligado en parte de las condiciones exteriores, permitiendo además, obtener una mejor eficacia de absorción de calor por la cortina de aire. A continuación se muestra la instrumentación instalada en la probeta y los datos del ensayo de contraste.

C.5.1 Instrumentación de la muestra

Con la experiencia obtenida de los ensayos anteriores, y debido a las características propias de la muestra de fachada forzada se modifica el esquema de instrumentación empleada en el ensayo. En la Tabla C.5 se recogen el listado de sondas colocadas en cada capa de la probeta. Al disponer de menos capas se puede ampliar el número de sondas instaladas en la cámara de aire.

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES		
			CAPA 1-2-3	CA	TOLVA
FV FORZADA	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	12	1
	Dif Temperatura	Termopila tipo T 10 puntas		1	
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1		1	
	Caudal aire	KIMO CP300-ALETAS DEBIMO			1
	Dif Presión	Ahlborn FD8612DPS/APS		3	

Tabla C.5 – Sensores instalados en la probeta de fachada ventilada forzada

Esto permite obtener una mejor información del comportamiento del aire en toda la superficie de la probeta, además se analiza un perfil transversal de la cámara en el punto central. En la Figura C.43 se muestra el esquema constructivo donde se puede apreciar la simplicidad constructiva. La probeta presenta sólo tres superficies, y la hoja interior se reduce a la capa de aislamiento directamente.

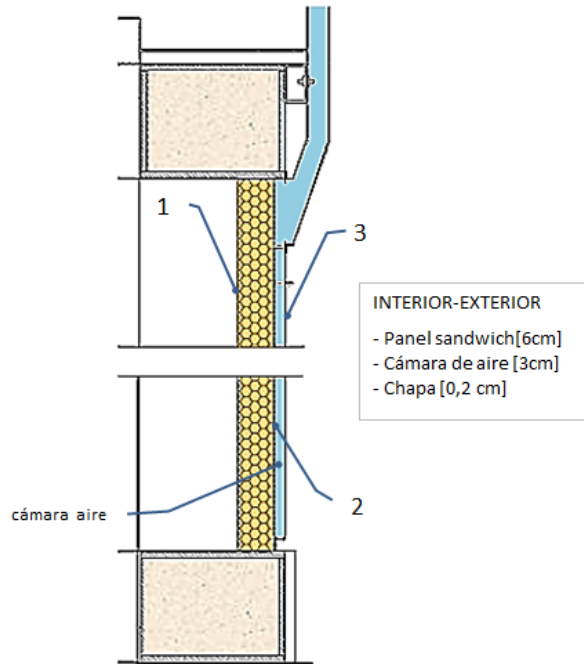


Figura C.43 – Solución constructiva de la fachada ventilada forzada

En la Figura C.44 se muestra la disposición de las sondas de temperatura instaladas en las tres capas.

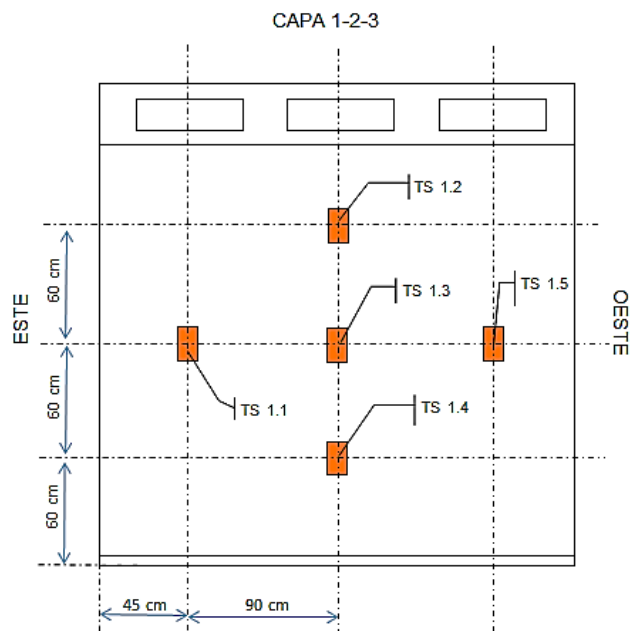


Figura C.44 – Esquema de montaje de las sondas de temperatura en las tres capas de la muestra

En la Figura C.45 se muestran las sondas colocadas en la cámara de aire ventilada, tanto de temperaturas, velocidad de aire, y diferencia de presión.

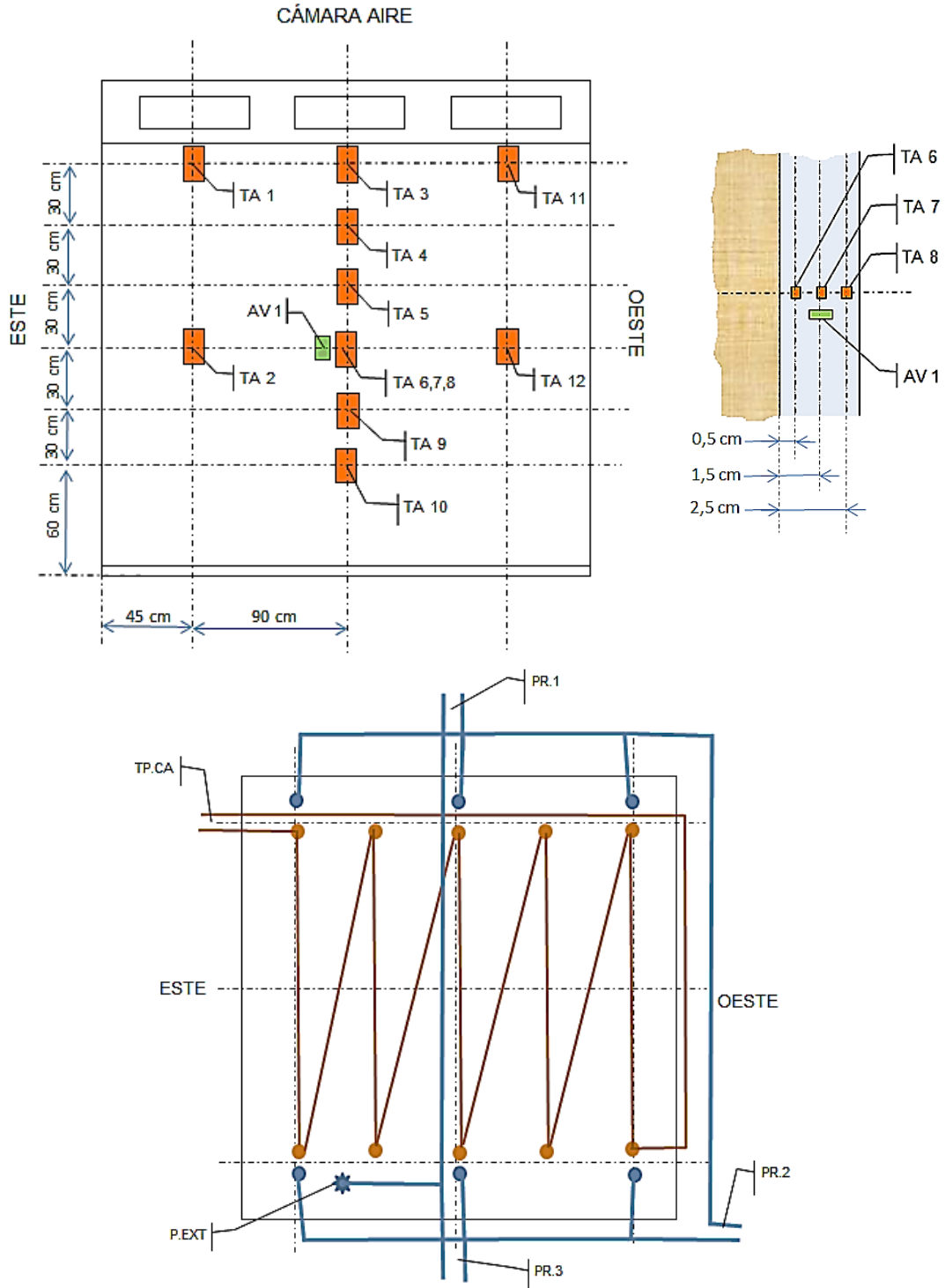


Figura C.45 – Esquema de montaje de las sondas en la cámara de aire

C.5.2 Datos experimentales ensayos de contraste

En la Figura C.46 y en la Figura C.47 se muestran los datos de las condiciones ambientales durante el periodo de ensayo de contraste realizado a la probeta de fachada ventilada forzada.

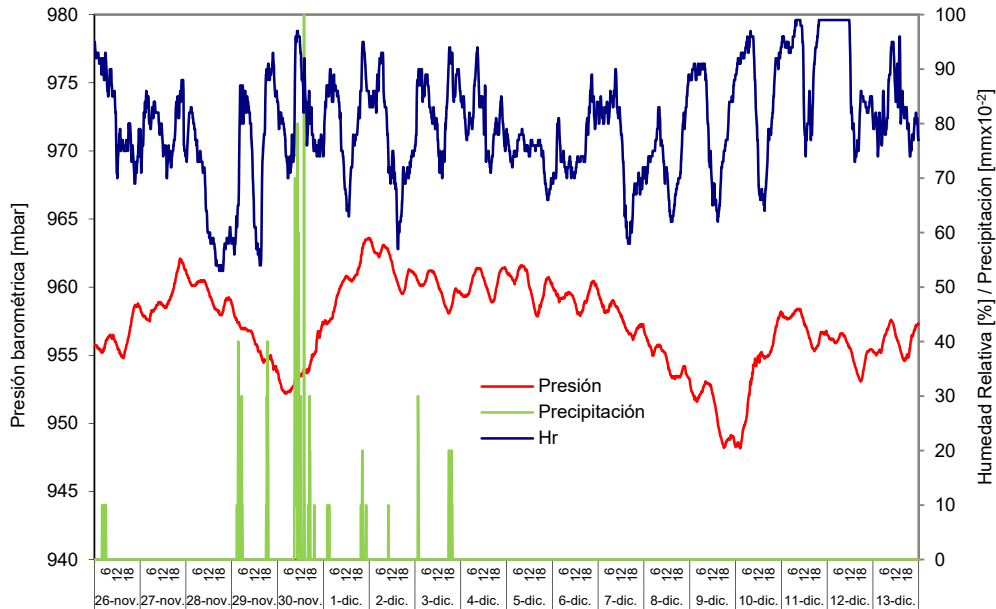


Figura C.46 – Condiciones ambientales durante el ensayo de la fachada ventilada forzada durante el periodo de contraste

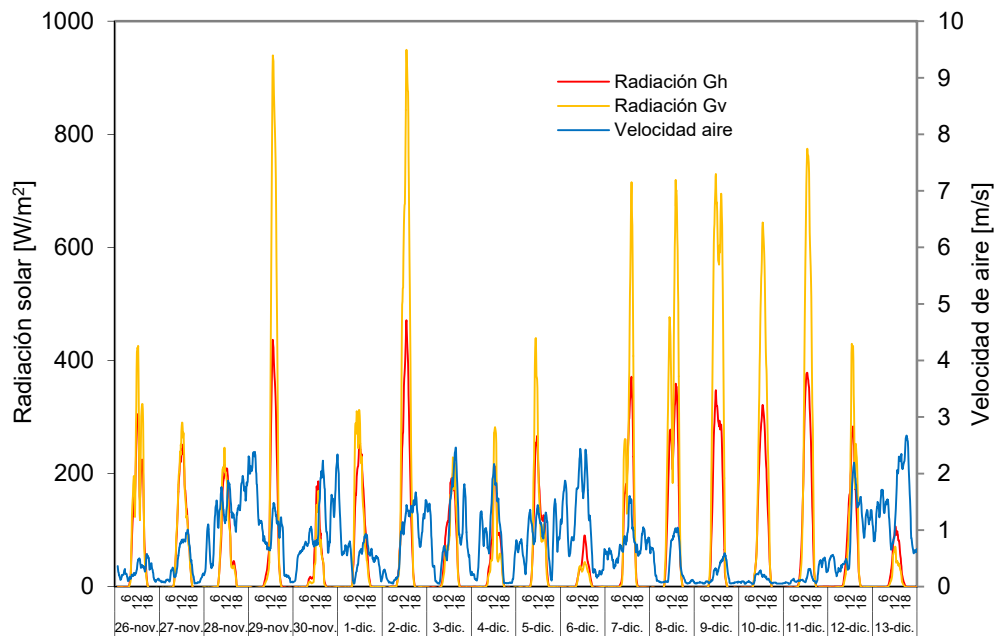


Figura C.47 – Radiación solar y velocidad de viento durante el ensayo de modelado de la fachada ventilada forzada

En la Figura C.48 y en la Figura C.49 se muestran la evolución de los flujos de calor y temperaturas en la sala de ensayos.

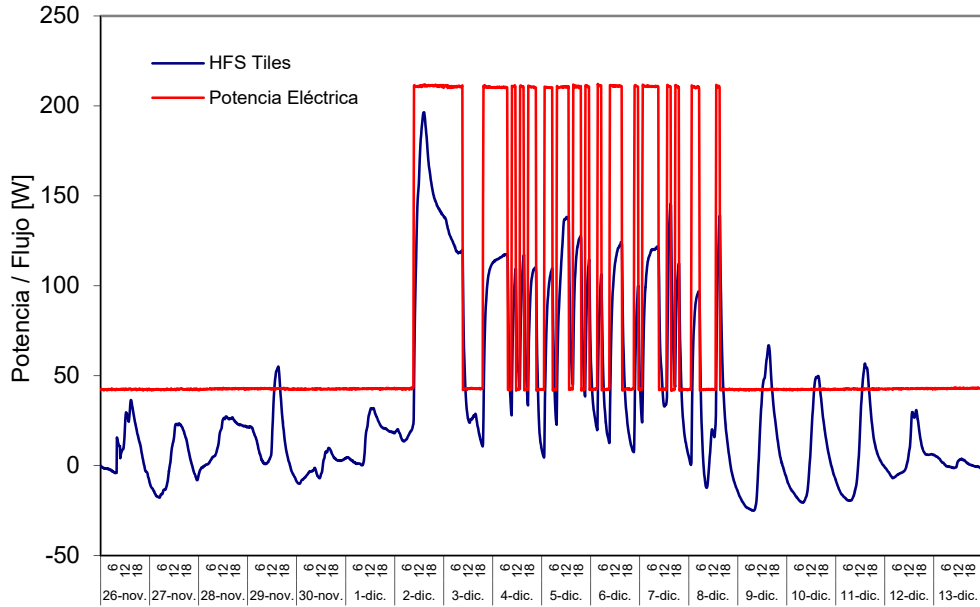


Figura C.48 – Potencia introducida y flujo de calor de la envolvente de la sala de ensayos para la fachada ventilada forzada

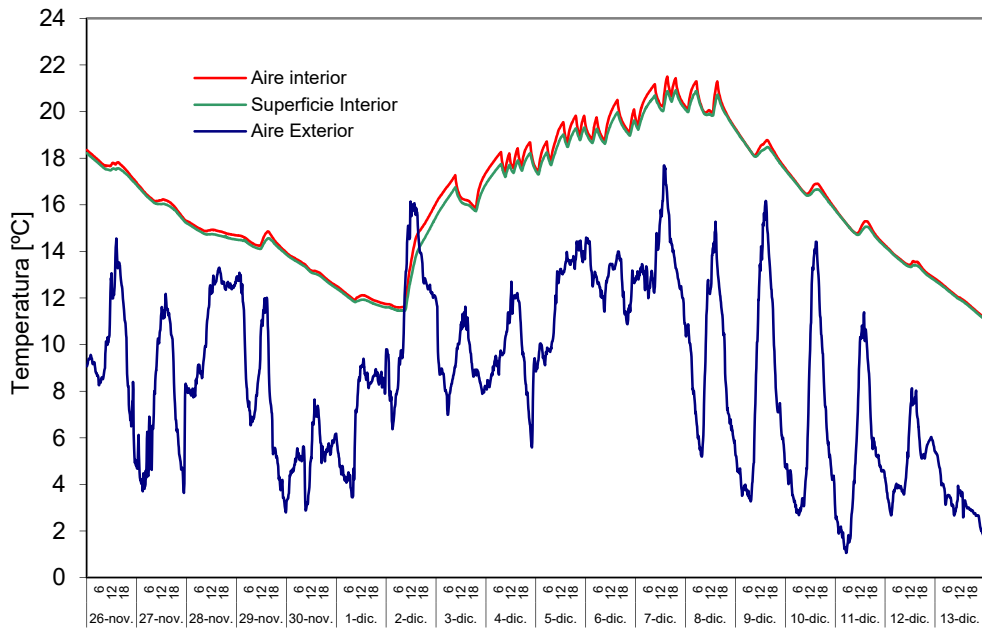


Figura C.49 – Temperatura de la sala de ensayos y ambiental para la fachada ventilada forzada

En la Figura C.50 se analiza la homogeneidad de temperaturas de la sala de temperaturas y el salto entre ambientes.

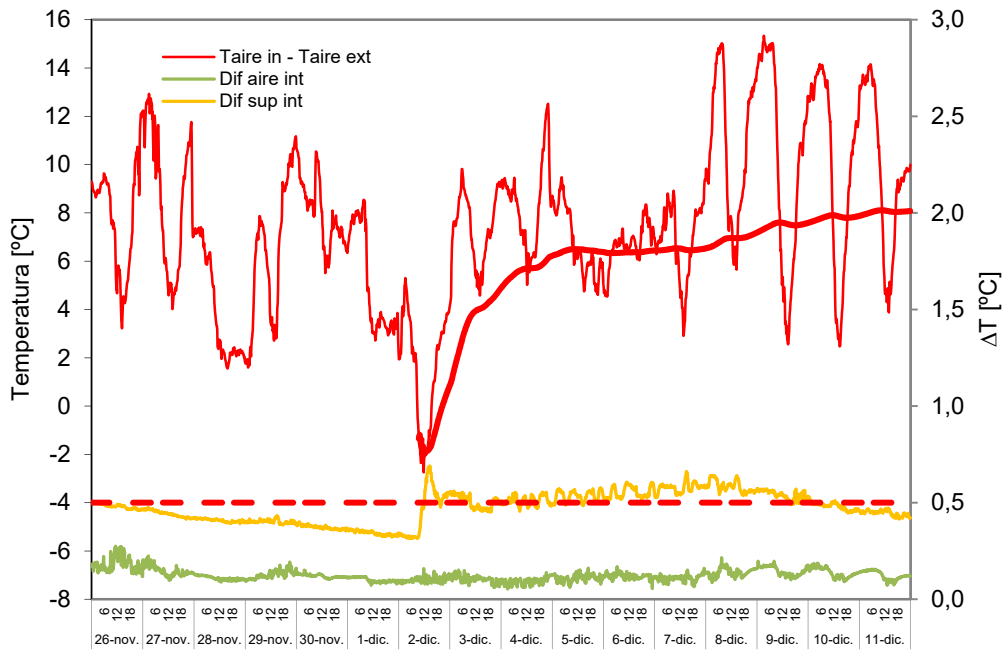


Figura C.50– Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada forzada

En la Figura C.51 se muestran las temperaturas medias en cada capa de la probeta de fachada forzada, y la homogeneidad en la superficie interior.

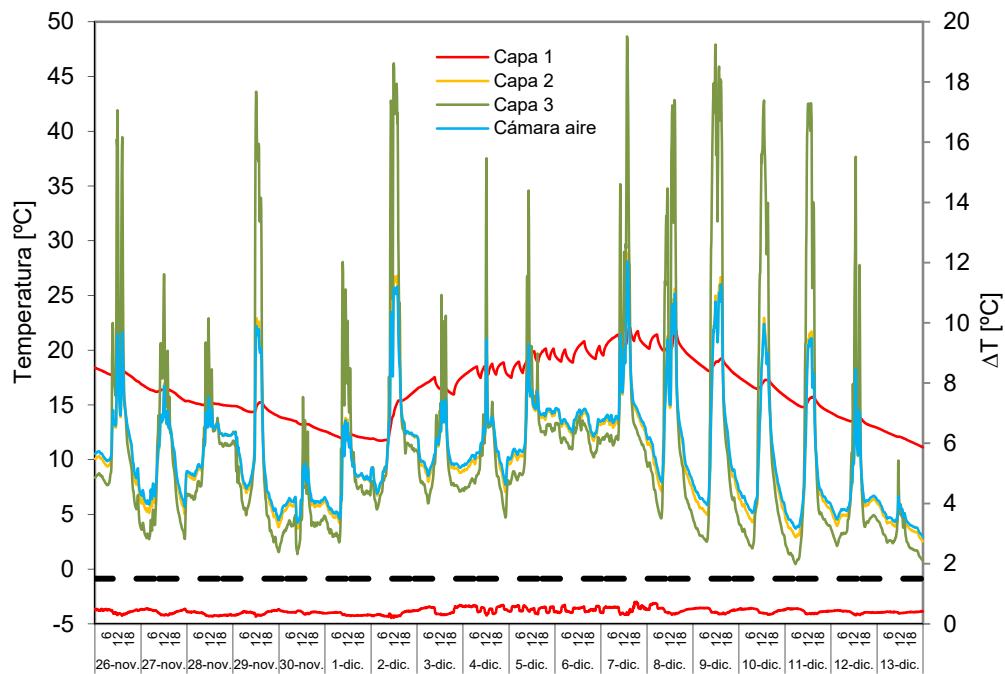


Figura C.51 – Temperaturas en la probeta de fachada ventilada forzada

En la Figura C.52 se muestran la evolución de la temperatura del aire de la cámara ventilada en función de la altura, junto con las temperaturas de las superficies que la conforman.

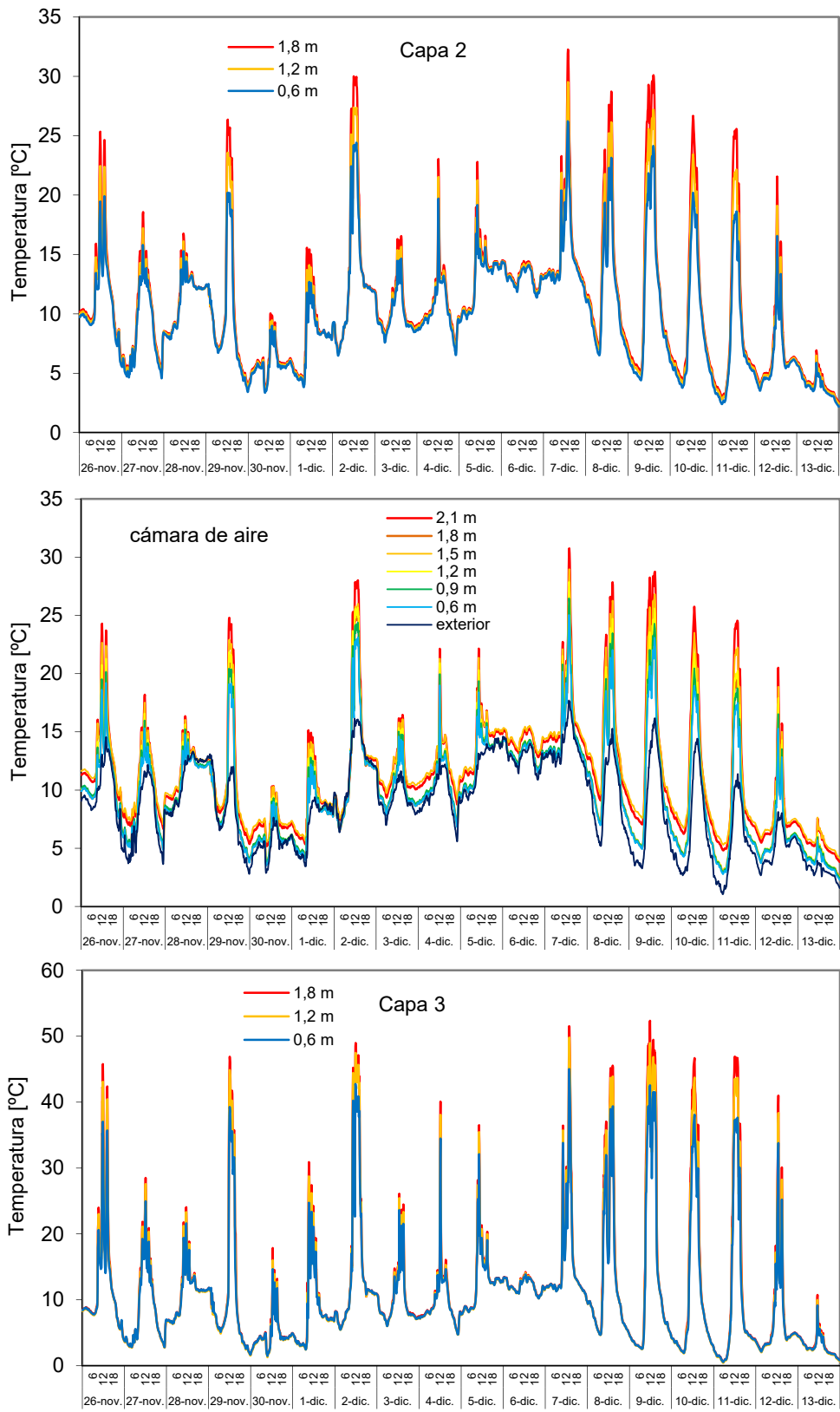


Figura C.52–Temperatura en función de la altura en el eje central de la cámara ventilada en la probeta de fachada forzada

En la Figura C.53 se muestra la comparativa entre la diferencia de temperaturas entrada-salida del aire en la cámara ventilada medida por la termopila y por las sondas de temperatura puntuales.

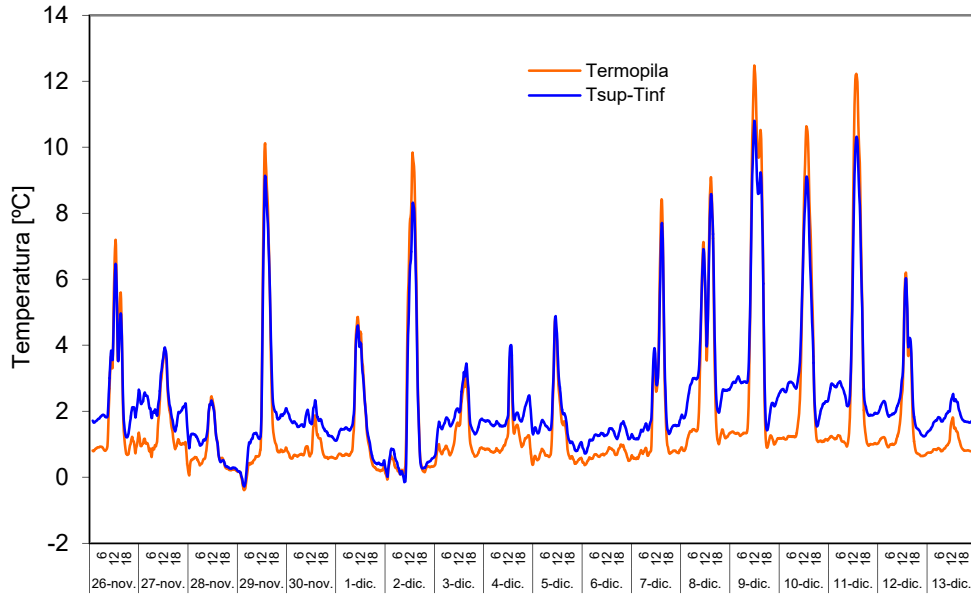


Figura C.53 – Salto de temperatura en la cámara de aire ventilada medido por la termopila y por las sondas instaladas en el eje central de la muestra

En la Figura C.54 se muestra la comparativa entre el caudal de aire medido en la tolva de extracción frente a la velocidad de aire puntual medida por el termoanemómetro situado en el punto central de la cámara de aire a media altura de la probeta.

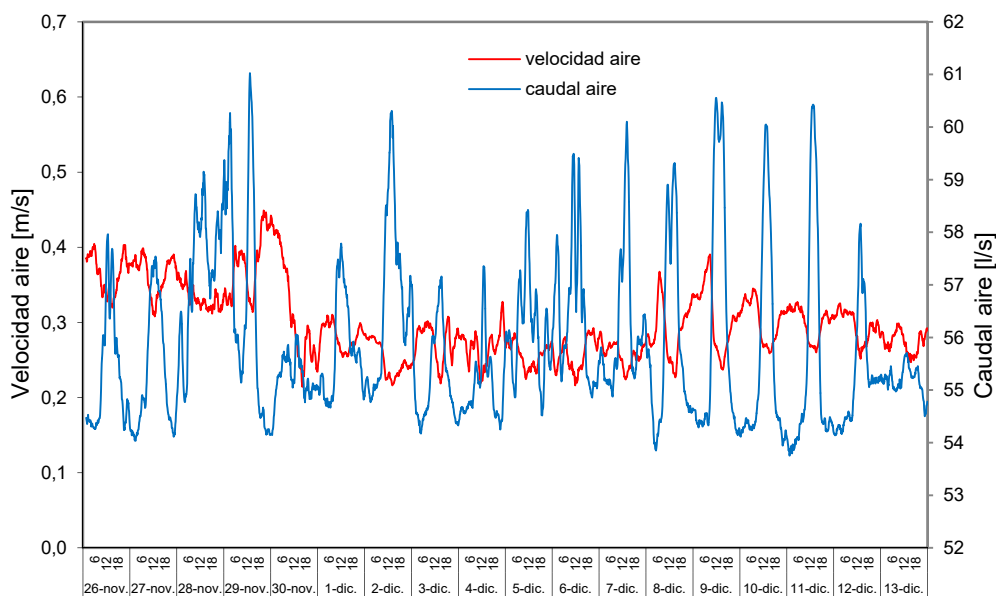


Figura C.54 – Caudal de aire circulante por la cámara ventilada y velocidad de aire en el punto central de la muestra

En la Figura C.55 se muestran las lecturas de las sondas de diferencia de presión instaladas en la zona de entrada y salida respecto al caudal de aire circulante por la fachada.

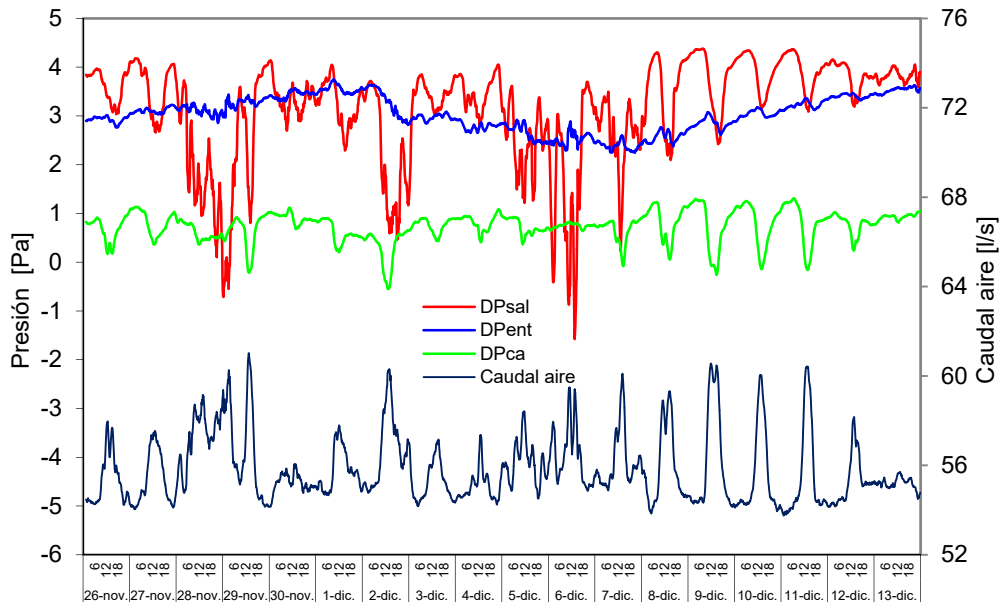


Figura C.55– Caída de presión en la fachada forzada y caudal de aire circulante por la cámara ventilada

C.6 Ensayo de infiltraciones

El análisis de las insiltraciones es un punto importante de cara a la incertidumbre del ensayo. A continuación se muestra en la Tabla C.6 los caudales de infiltraciones obtenidos con salto de presiones de $\Delta P = 50$ [Pa], entre la sala de ensayos y el ambiente exterior. Según los requisitos del ensayo PASLINK, el caudal máximo admisible para que las infiltraciones no tengan un efecto representativo en la incertidumbre de ensayo es de $m_a^{max} = 18$ [Nm^3/h], para la celda EGUZKI, que equivale a 0,5 [ren/h] de ambiente de la sala de ensayos.

	m_a [Nm^3/h]	
	INICIO	FIN
MURO BASE	10,6	14,2
MURO BASE + SATE	7,8	13,9
FV LIGERA	10,0	16,5
FV PESADA	9,4	15,0
FV FORZADA	14,4	17,5

Tabla C.6 – Medida de infiltraciones en los ensayos de las probetas analizadas

Antes de iniciar el periodo de ensayo se realiza una prueba de presión, midiendo el caudal de infiltraciones aplicando condiciones de sobrepresión y condiciones de subpresión, hasta un salto del orden de 100 [Pa] y decreciendo en intervalos de 10

[Pa]. Los datos experimentales se ajustan a una función potencia que se emplea para determinar el valor fiable de caudal de renovación de referencia. Si el caudal de infiltraciones supera el límite admisible o se acerca al mismo se realiza un sellado de juntas y apriete del sistema de portamuestras hasta alcanzar valores admisibles. Una vez verificado este punto se inicia el periodo de ensayo de la muestra. Una vez finalizado el mismo, antes de acceder a la sala de ensayos se realiza otra prueba de presión para verificar que durante el periodo de ensayo las condiciones no se han modificados sustancialmente y el ensayo se puede dar por válido. En esta segunda prueba de presión es norma obtener caudales más altos debido a que los cordones de sellante se retraen con los ciclos de calor y frio del periodo de ensayo, generando un aumento de las infiltraciones. A continuación, en la Figura C.56 y en la Figura C.57 se muestran los datos exactos de las diferentes pruebas de presión realizadas a cada ensayo.

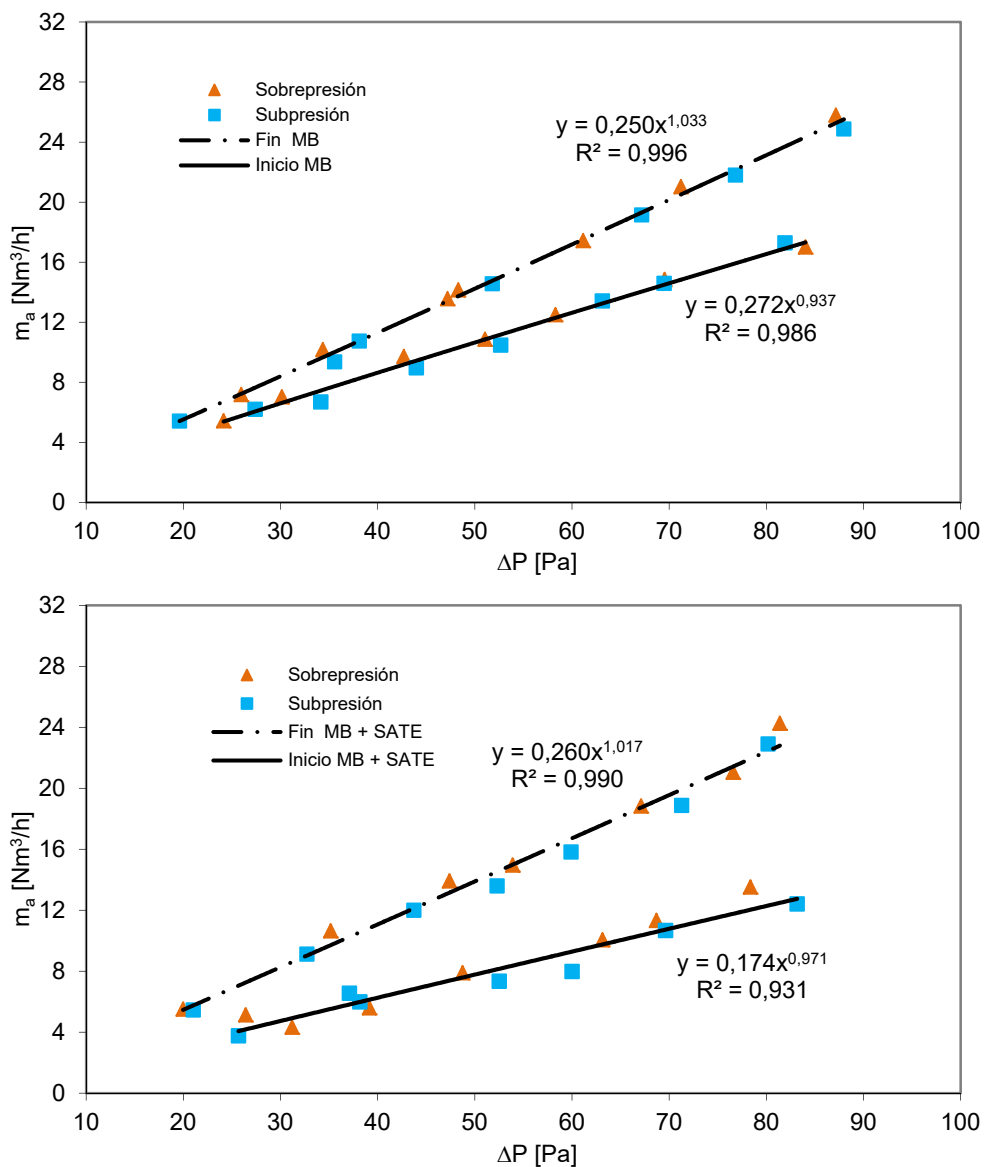


Figura C.56- Prueba de infiltraciones realizada a cada probeta al inicio y fin del ensayo

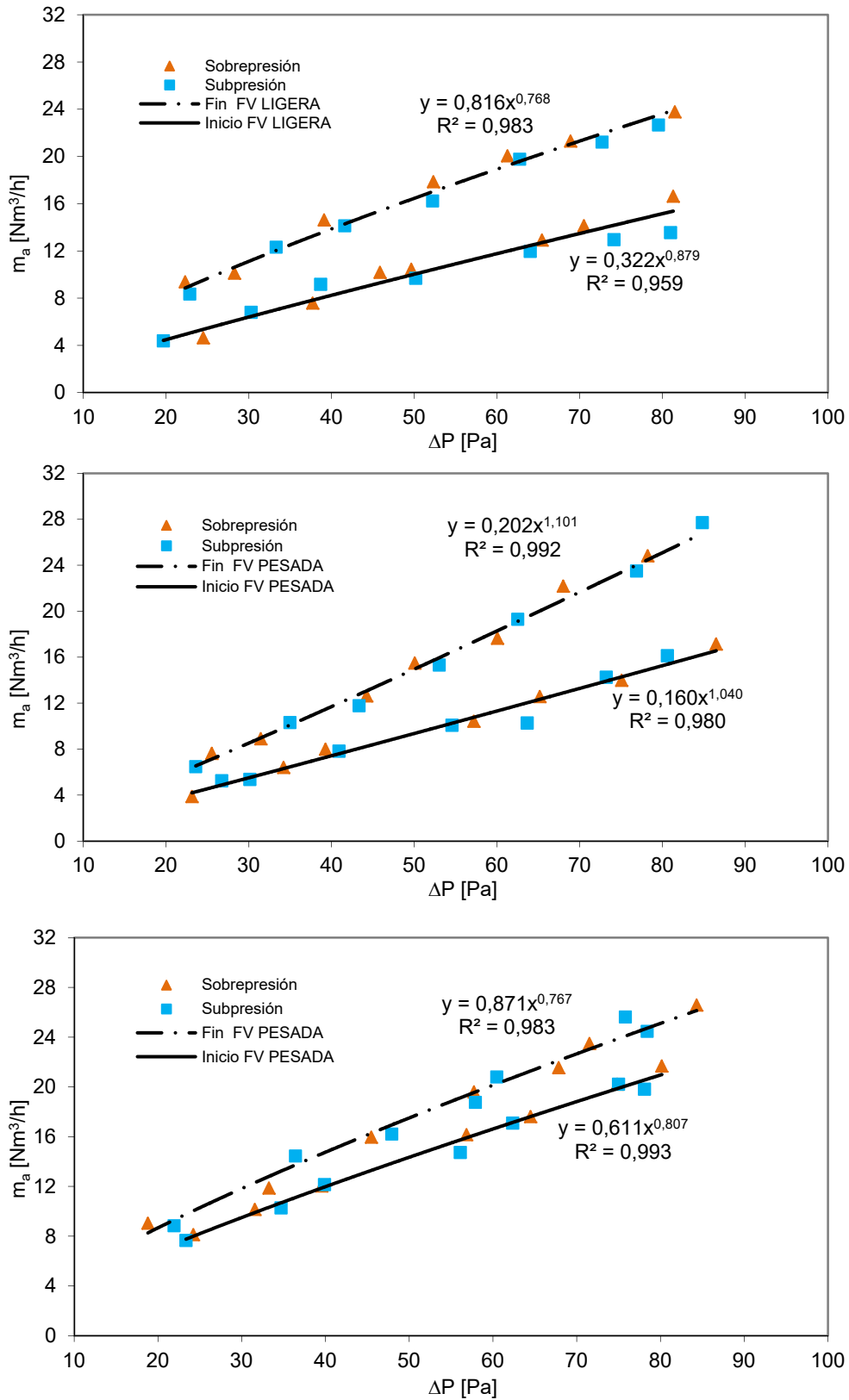
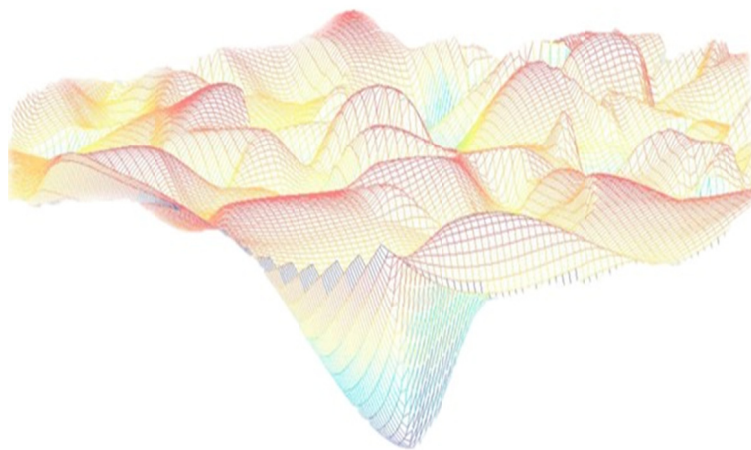


Figura C.57– Prueba de infiltraciones realizada a cada probeta al inicio y fin del ensayo

Anexo D

Modelos matemáticos de las fachadas





D.1 Modelo de muro base sin aislamiento

El ensayo del muro base tiene un carácter fundamental, no tanto por la complejidad de la probeta sino por ser el primer ensayo de una muestra eterogénea frente a las características homogéneas del muro de calibración y de los componentes del IQ-Test. Este ensayo permite obtener un primer resultado de incertidumbre aplicado a muestras de fachada real. Además, por tratarse de la solución constructiva que sirve como base para dos de las fachadas ventiladas bajo estudio, su adecuada caracterización es fundamental para obtener precisión en el análisis de flujos intercambiados en las superficies de las cámaras ventiladas. Por esta razón, el proceso de análisis se configura de forma similar al empleado en el ensayo IQ-Test, primero se analiza el flujo unidimensional mediante las sondas de temperatura y fluxímetros puntuales instalados en la zona central de la muestra y después se analiza la probeta completa con un modelo a escala de celda. A continuación se muestran los resultados de dichos modelos.

D.1.1 Modelo unidimensional

En la Figura D.1 se muestra el modelo del muro base para el análisis de condiciones de flujo unidimensional. El modelo es de cuarto orden y se representan las diferentes capas que lo conforman. El tabique interior se modela entre los nodos T_1 y T_2 , la cámara de aire entre los nodos T_2 y T_3 , y la hoja exterior mediante los nodos T_3 y T_4 .

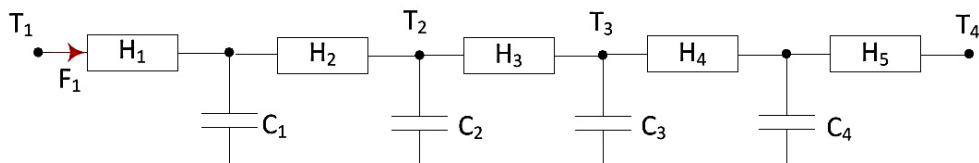


Figura D.1 – Modelo flujo unidimensional del muro base sin aislamiento

Las ecuaciones [D.1] y [D.2] recogen las características del modelo y la definición de las funciones objetivo, que corresponden con las temperaturas de las capas interiores de la muestra, T_2 y T_3 , y el flujo en la superficie interior, F_1 .

$$\begin{bmatrix} dT_{12} \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_4 \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt \quad [D.1]$$

$$\begin{bmatrix} T_2^m \\ T_3^m \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -H_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ H_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_4 \end{bmatrix} + [e] \quad [D.2]$$

En la Tabla D.1 y en la Tabla D.2 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.3 y Figura D.4.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0,1	10	1000	8.38E+00	3.43E-01	27,692	0	0,0040
H ₂	0,1	10	1000	1.79E+01	1.06E-01	96,157	0,0047	0
C ₁	1	100	1500	5.49E+01	8.22E-01	73,235	0,0031	0,0044
C ₂	1	100	1500	2.68E+01	6.23E-01	96,970	-0,0016	-0,0045
H ₃	0,1	10	1000	5.34E+00	9.28E-02	92,449	0	0
C ₃	1	100	1500	2.28E+02	3.02E+01	13,231	-0,0042	0
H ₄	0,1	10	1000	1.15E+01	3.63E+00	3,626	0	0,0022
C ₄	1	100	1500	3.36E+01	6.22E+00	66,426	0,0042	-0,0018
H ₅	0,1	10	1000	1.54E+01	1.70E+00	97,062	0,0043	0,0044

Tabla D.1 – Resultados identificación parámetros para el modelo unidimensional del muro base

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅
H ₁	1								
H ₂	0,27	1							
C ₁	0,06	0,20	1						
C ₂	0,47	0,33	0,44	1					
H ₃	0,23	0,47	0,30	0,17	1				
C ₃	0,08	0,47	0,01	0,07	0,12	1			
H ₄	0,07	0,12	0,01	0,14	0,29	0,41	1		
C ₄	0,02	0,25	0,34	0,15	0,32	0,22	0,44	1	
H ₅	0,44	0,09	0,37	0,19	0,25	0,46	0,00	0,07	1

Tabla D.2 – Coeficientes de correlación parámetros modelo unidimensional del muro base

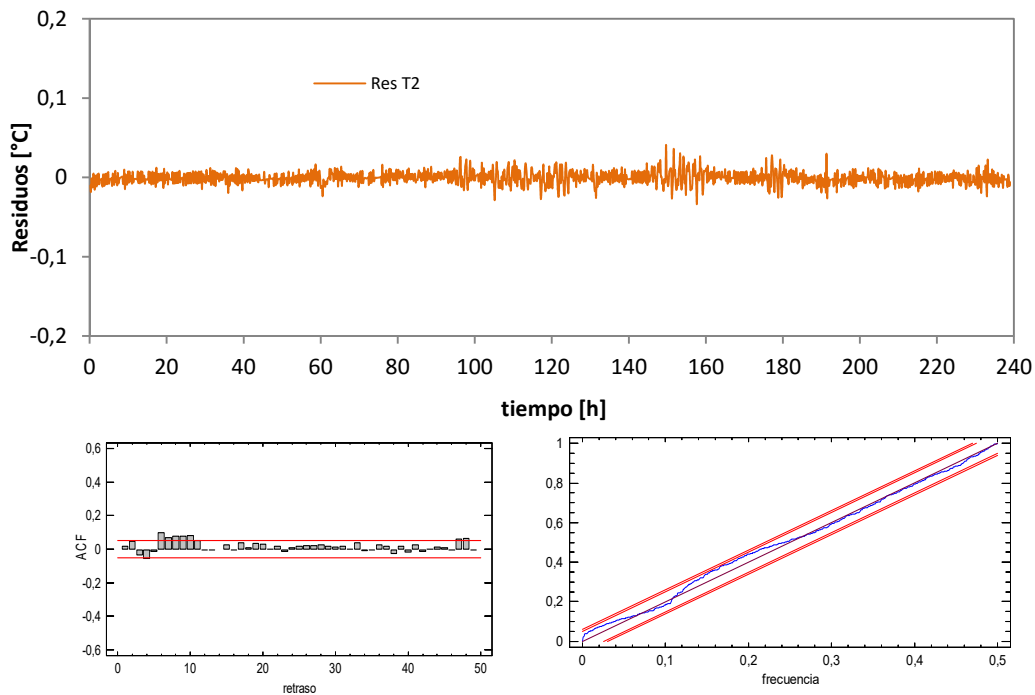


Figura D.2 – Ajuste del modelo unidimensional del muro base

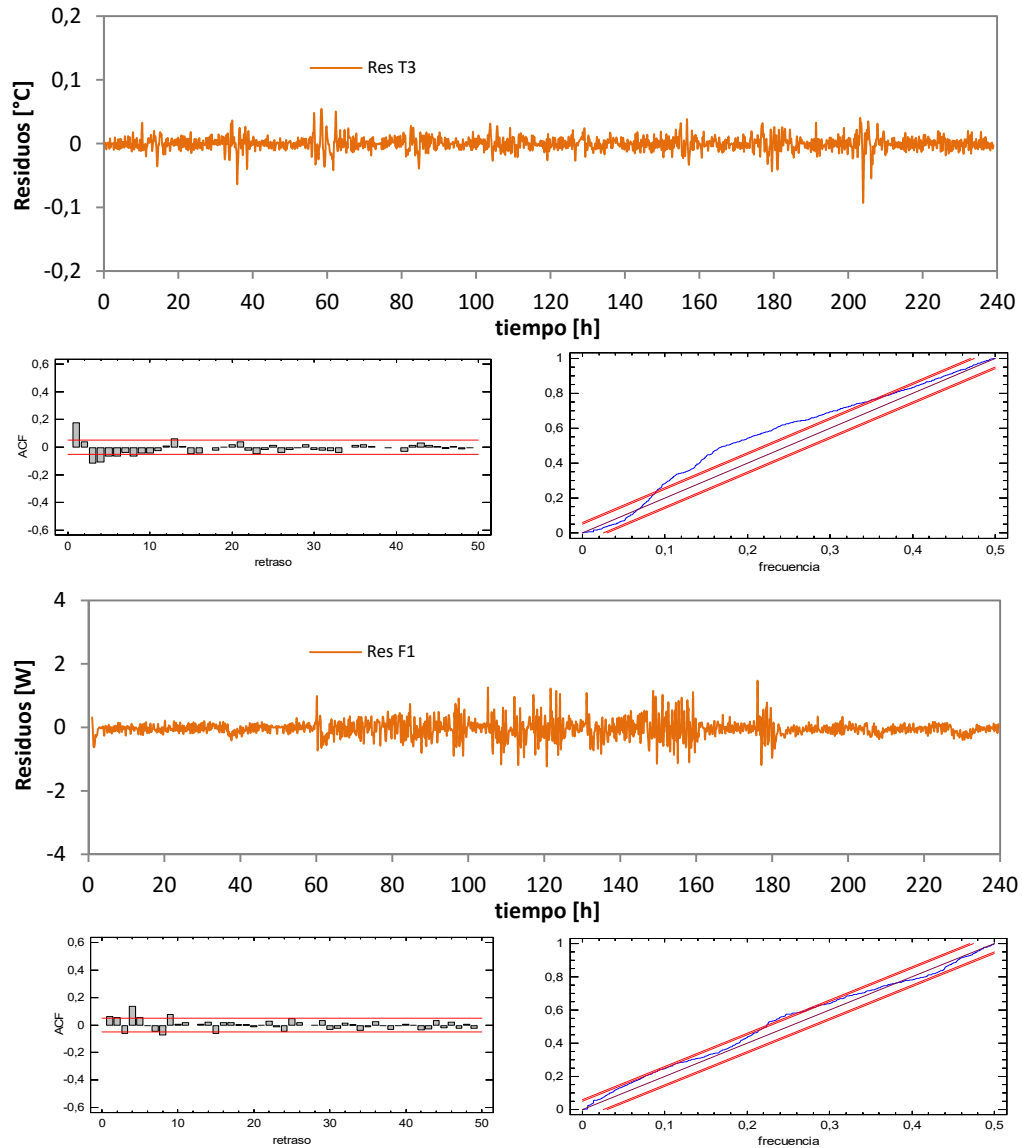


Figura D.3 – Ajuste del modelo unidimensional del muro base

En la Tabla D.3 se muestran los resultados finales de las propiedades térmicas del muro base obtenidas a través de los resultados del modelo de identificación.

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0,175	2,9	C _{tab}	0,049	1,8
R _{ca}	0,187	1,7	C _{perf}	0,157	13,9
R _{perf}	0,152	18,0	C_{total}	0,207	11,0
R_{total}	0,514	6,9			

Tabla D.3 – Propiedades de cada capa del modelo unidimensional de muro base

D.1.2 Modelo completo

En la Figura D.4 se muestra el modelo completo a escala de celda, en el que se tiene en cuenta la radiación solar incidente sobre la superficie exterior. En la ecuación [D.3] y en la ecuación [D.4] se muestra su expresión matricial.

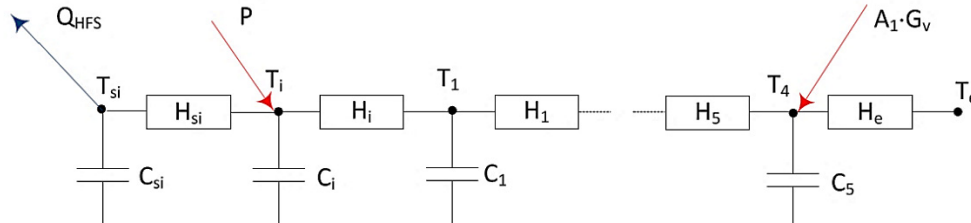


Figura D.4 – Modelo flujo completo del muro base sin aislamiento

$$\begin{bmatrix} dT_{si} \\ dT_i \\ dT_1 \\ dT_{12} \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{34} \\ dT_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_{si}}{C_{si}} & \frac{H_{si}}{C_{si}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_{si}}{C_i} & \frac{-(H_{si} + H_i)}{C_i} & \frac{H_i}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_i}{C_1} & \frac{-(H_i + H_1)}{C_1} & \frac{H_1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-(H_1 + H_2)}{C_{12}} & \frac{H_2}{C_{12}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} & \frac{H_5}{C_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_5} & \frac{-(H_5 + H_e)}{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{si} \\ T_i \\ T_1 \\ T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \\ T_4 \end{bmatrix} dt \quad [D.3]$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{si}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_e}{C_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{A_1}{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt$$

$$\begin{bmatrix} T_{si}^m \\ T_i^m \\ T_1^m \\ T_2^m \\ T_3^m \\ T_4^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_1 \\ T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \\ T_4 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} + [e] \quad [D.4]$$

En la Tabla D.3 y en la Tabla D.4 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.6 y Figura D.7.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H _{si}	100	250	500	3.41E+02	9.89E+00	70.207	-0.0005	-0.0039
C _{si}	100	1000	2000	9.79E+02	4.72E+01	69.372	-0.0042	-0.0032
C _i	1	50	100	5.89E+01	6.19E+00	12.952	-0.0044	0.0013
H _i	1	50	100	6.27E+01	1.06E+00	54.845	-0.0002	-0.0042
C ₁	10	500	1000	2.14E+02	1.13E+01	6.942	0.0038	-0.0044
H ₁	1	10	100	7.44E+01	3.55E+00	70.089	0.0026	-0.0007
H ₂	1	10	100	1.02E+02	4.13E+00	81.745	-0.0038	0.0014
C ₁₂	10	500	1000	1.49E+02	1.95E+01	31.286	0.0038	0.0010
C ₂	10	500	1000	1.82E+02	3.79E+00	75.355	-0.0030	0.0027
H ₃	10	50	100	3.90E+01	1.11E+00	70.111	0.0044	-0.0004
C ₃	100	1000	2000	9.69E+01	2.31E+00	9.414	-0.0039	0.0008
H ₄	10	100	500	1.54E+02	7.52E-01	29.116	0.0031	0.0045
C ₄	100	1000	2000	3.45E+02	1.56E+01	27.421	0.0040	-0.0042
H ₅	10	100	500	7.42E+01	9.06E-01	33.667	0.0031	-0.0011
C ₅	100	1000	2000	9.05E+01	4.10E+00	10.393	-0.0011	0.0015
H _e	10	200	500	1.71E+02	2.02E+01	63.901	-0.0046	0.0008
A ₁	1	4	7	5.81E+00	6.78E-01	21.375	0.0013	-0.0015

Tabla D.3 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo del muro base

	H _{si}	C _{si}	C _i	H _i	C ₁	H ₁	H ₂	C ₁₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅	C ₅	H _e	A ₁
H _{si}	1																
C _{si}	0.22	1															
C _i	0.29	0.01	1														
H _i	0.48	0.02	0.60	1													
C ₁	0.15	0.49	0.21	0.27	1												
H ₁	0.58	0.54	0.61	0.05	0.19	1											
H ₂	0.52	0.28	0.21	0.18	0.12	0.29	1										
C ₁₂	0.66	0.60	0.09	0.67	0.50	0.48	0.47	1									
C ₂	0.31	0.28	0.37	0.15	0.37	0.17	0.32	0.38	1								
H ₃	0.36	0.55	0.24	0.28	0.34	0.66	0.45	0.31	0.08	1							
C ₃	0.08	0.26	0.29	0.15	0.13	0.05	0.00	0.57	0.13	0.31	1						
H ₄	0.49	0.11	0.63	0.11	0.31	0.59	0.12	0.48	0.63	0.50	0.02	1					
C ₄	0.36	0.59	0.29	0.41	0.65	0.43	0.20	0.64	0.12	0.25	0.07	0.43	1				
H ₅	0.15	0.48	0.29	0.55	0.07	0.34	0.24	0.00	0.52	0.65	0.04	0.28	0.36	1			
C ₅	0.48	0.59	0.56	0.46	0.23	0.30	0.03	0.15	0.16	0.19	0.45	0.52	0.08	0.28	1		
H _e	0.53	0.58	0.47	0.57	0.33	0.51	0.49	0.56	0.24	0.40	0.59	0.39	0.29	0.07	0.14	1	
A ₁	0.33	0.29	0.23	0.44	0.27	0.23	0.37	0.18	0.34	0.07	0.45	0.33	0.20	0.08	0.66	0.03	1

Tabla D.4 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo del muro base

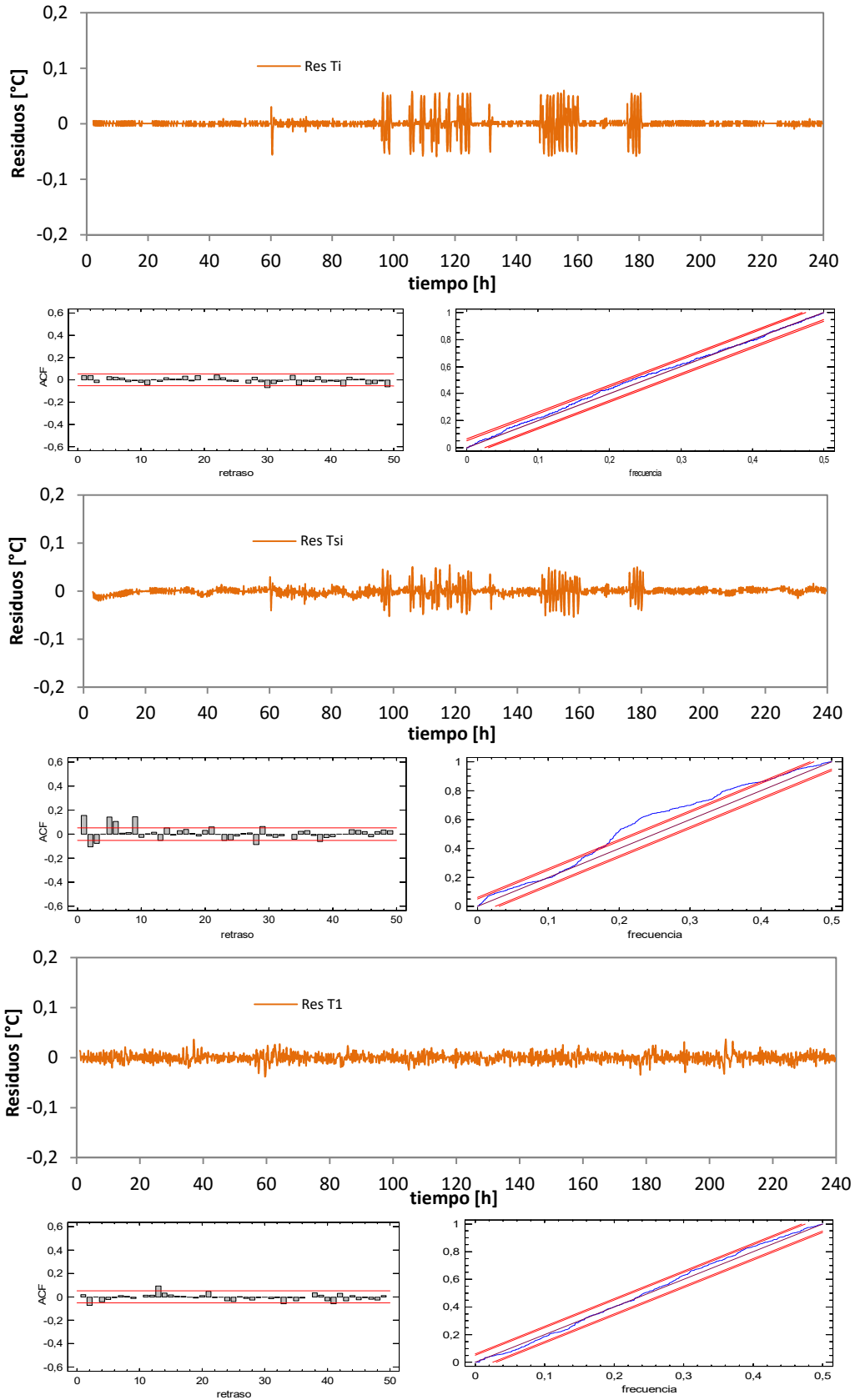


Figura D.6 – Ajuste del modelo completo del muro base

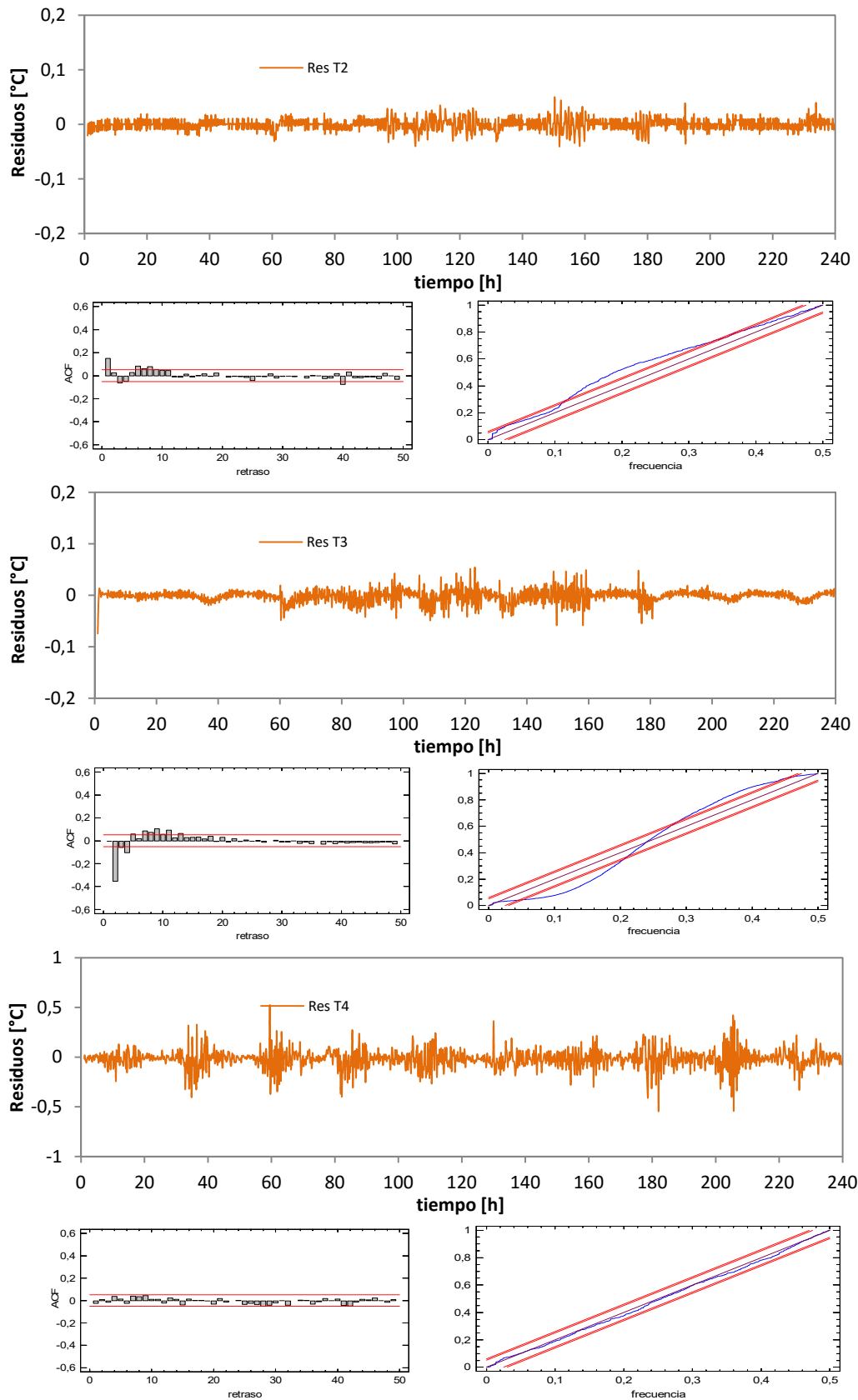


Figura D.7 – Ajuste del modelo completo del muro base

Una vez validados los resultados del modelo de identificación en la Tabla D.5 se muestran los resultados finales para las propiedades térmicas correspondientes a cada capa del muro base, junto con la incertidumbre final del ensayo.

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0,168	4,3	C _{tab}	0,045	6,3
R _{ca}	0,185	2,8	C _{perf}	0,162	3,9
R _{perf}	0,144	1,0	C_{total}	0,208	4,4
R_{total}	0,496	2,8			

Tabla D.5 –Propiedades del modelo de celda completo para el muro base

D.2 Modelo de muro base con aislamiento

En todo proceso de estudio experimental es necesario complementar los resultados de las medidas y ensayos con la incertidumbre que acompaña a los mismos, para así, poder tomar decisiones de su validez y del rango de aplicación. Entendiendo el concepto de incertidumbre como una cuantificación de la calidad del resultado indicado, y como una herramienta fundamental para la declaración de conformidad con respecto a unas especificaciones o procedimientos. El proceso de medida se estudia de forma que se identifique el máximo número de causas de error, controlando sus valores por debajo de un límite admisible, y trasladando su efecto en la expresión de la incertidumbre del resultado. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el diagrama causa-efecto en el procedimiento *PASLINK*. En dicho diagrama se recogen el conjunto de fuentes que participan de la incertidumbre del ensayo.

D.2.1 Modelo unidimensional

Siguiendo la misma metodología para el muro base con aislamiento, primero se determina el comportamiento unidimensional mediante las sondas de temperatura y flujo situadas en la zona central de la muestra y posteriormente se analiza el componente completo. En la Figura D.8 se muestra el modelo ampliado para representar la capa de aislamiento. Aunque la capa de aislamiento no tiene una capacidad térmica representativa, de cara al ajuste del modelo durante el proceso de identificación de parámetros es más correcto representarla mediante dos conductancias y una capacidad. Las que ecuaciones que representan dicho modelo se muestran en [D.5] y en [D.6].

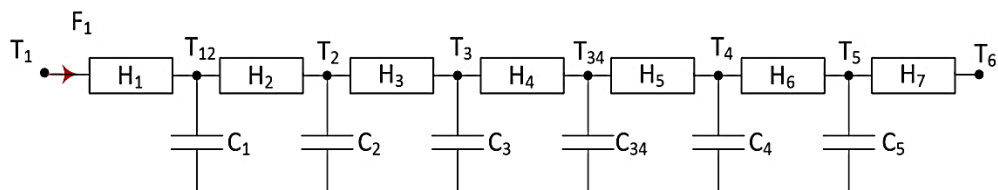


Figura D.8 – Modelo flujo unidimensional del muro base con aislamiento

$$\begin{bmatrix} dT_{12} \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \\ dT_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_{12}}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_{34}} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_{34}} & \frac{H_5}{C_{34}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_4} & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_4} & \frac{H_6}{C_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_6}{C_5} & \frac{-(H_6 + H_7)}{C_5} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_7}{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_6 \end{bmatrix} dt \quad [D.5]$$

$$\begin{bmatrix} T_2^m \\ T_3^m \\ T_4^m \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -H_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_6 \end{bmatrix} + [e] \quad [D.6]$$

En la Tabla D.6 y en la Tabla D.7 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.9 y Figura D.10.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.1	10	1000	1.71E+01	4.93E-01	33.638	-0.0049	0
H ₂	0.1	10	1000	8.53E+00	2.96E-01	6.436	0	-0.0037
C ₁	1	100	1500	2.39E+01	7.67E+00	38.158	-0.0033	0
C ₂	1	100	1500	5.74E+01	2.18E+00	54.400	0.0021	-0.0041
H ₃	0.1	10	1000	5.43E+00	2.90E-01	57.259	-0.0049	0.0019
C ₃	1	100	1500	8.50E+01	4.63E+00	94.190	0	0
H ₄	0.1	10	1000	1.10E+01	5.46E-01	51.812	0.0029	-0.0043
C ₃₄	1	100	1500	1.07E+02	1.48E+01	78.168	-0.0011	0
H ₅	0.1	10	1000	1.56E+01	2.00E-01	54.377	0.0017	-0.0047
C ₄	1	100	1500	6.90E+01	1.86E+00	69.459	-0.0021	0.0016
H ₆	0.1	10	1000	3.07E+00	1.87E-01	18.399	0.0027	-0.0015
C ₅	1	100	1500	1.47E+01	4.47E+00	2.945	0.0046	-0.0042
H ₇	0.1	10	1000	9.76E-01	5.14E-02	10.321	0	0

Tabla D.6 – Resultados identificación parámetros para el modelo unidimensional del muro base con aislamiento

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₃₄	H ₅	C ₄	H ₆	C ₅	H ₇
H ₁	1												
H ₂	-0.20	1											
C ₁	0.06	-0.46	1										
C ₂	0.09	-0.29	0.43	1									
H ₃	-0.45	0.03	-0.12	0.25	1								
C ₃	-0.11	0.21	0.21	0.26	0.23	1							
H ₄	-0.05	-0.06	0.31	-0.22	0.22	0.02	1						
C ₃₄	-0.36	0.14	-0.12	0.14	0.45	0.32	-0.48	1					
H ₅	0.26	-0.16	0.43	0.29	-0.29	0.01	0.36	0.08	1				
C ₄	-0.04	-0.24	-0.23	-0.15	0.11	0.38	0.11	0.01	0.15	1			
H ₆	-0.21	0.09	-0.37	-0.45	0.36	0.42	0.26	0.36	-0.16	-0.22	1		
C ₅	-0.36	-0.03	0.21	-0.42	0.09	0.17	0.49	0.17	0.44	-0.27	-0.49	1	
H ₇	0.07	-0.19	0.27	-0.45	0.03	0.25	0.31	-0.02	-0.41	-0.08	-0.39	-0.46	1

Tabla D.7 – Coeficientes de correlación parámetros modelo unidimensional del muro base con aislamiento

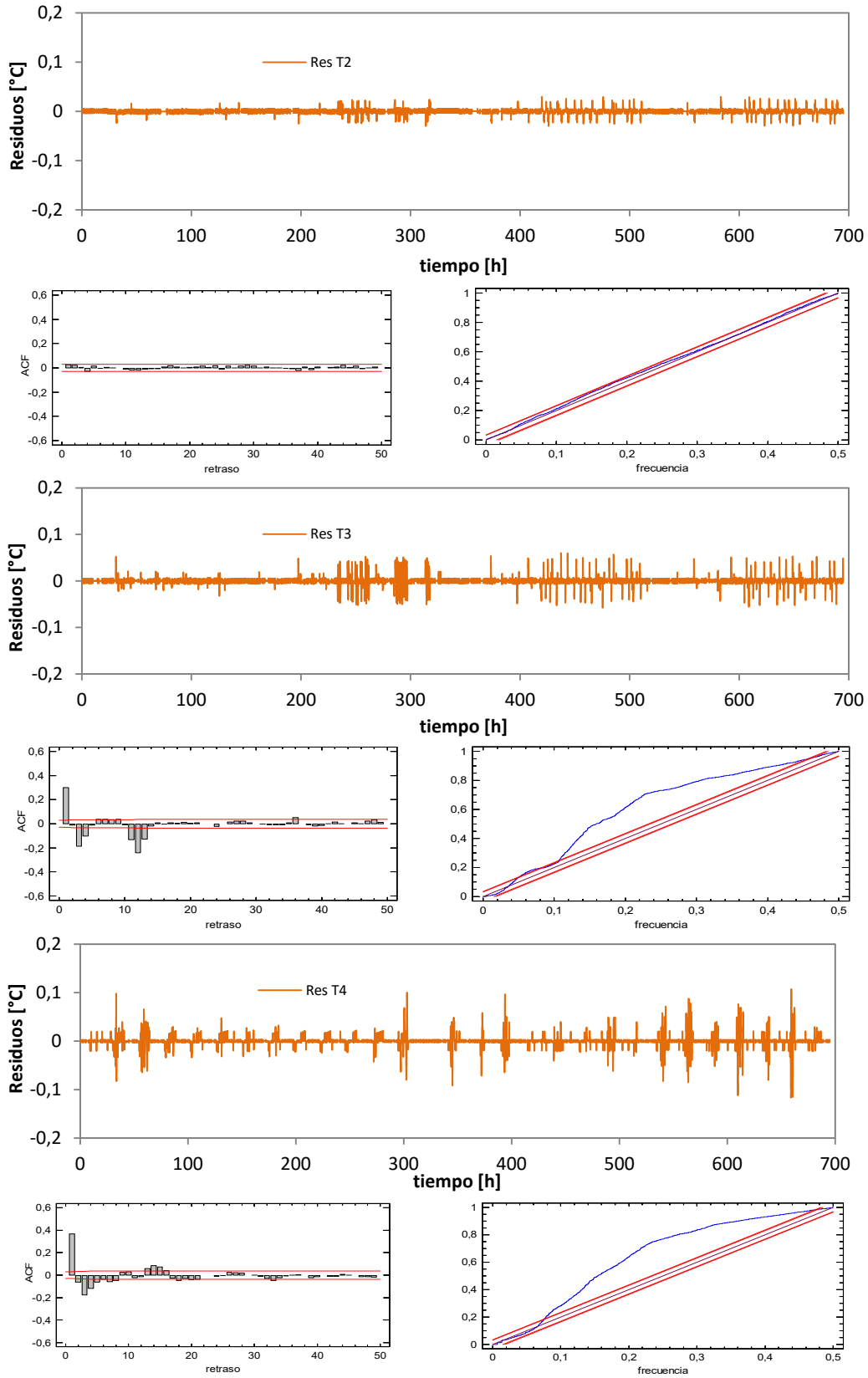


Figura D.9 – Ajuste del modelo unidimensional del muro base con aislamiento

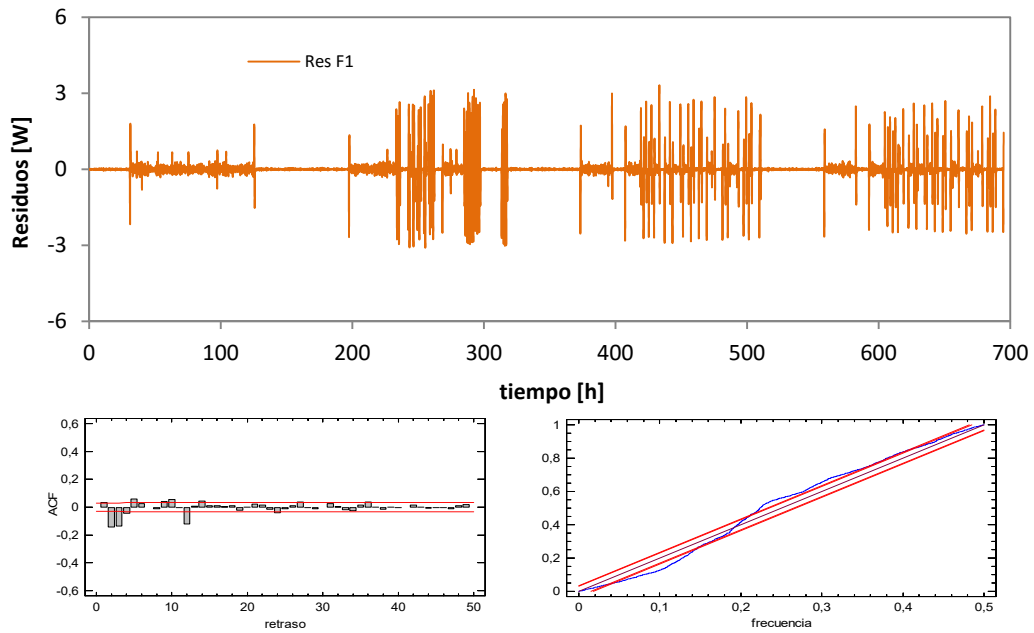


Figura D.10 – Ajuste del modelo unidimensional del muro base con aislamiento

Una vez validado el proceso de identificación de parámetros se obtienen los resultados finales de propiedades térmicas de cada capa de la muestra recogidos en la Tabla D.8.

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0,176	3,2	C _{tab}	0,049	12,1
R _{ca}	0,184	5,1	C _{perf}	0,156	8,2
R _{perf}	0,155	3,3	C _{SATE}	0,009	30,5
R _{SATE}	1,350	5,2	C_{total}	0,214	9,6
R_{total}	1,864	4,8			

Tabla D.8 – Propiedades del modelo unidimensional para el muro base con aislamiento

D.2.2 Modelo completo

Una vez resuelto el modelo unidimensional y verificados los resultados obtenidos se pasa a analizar el modelo a escala de celda, como se muestra en la Figura D.11, cuyas ecuaciones se recogen en [D.7] y [D.8].

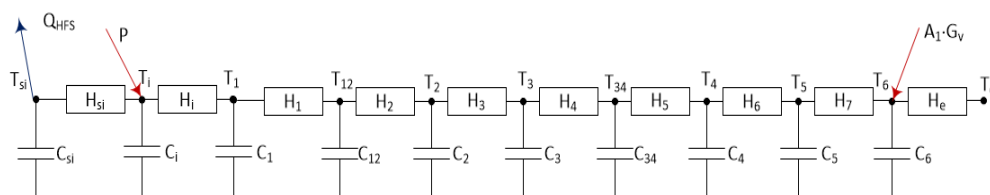


Figura D.11 – Modelo de celda para el muro base con aislamiento exterior

$$\begin{bmatrix} dT_{si} \\ dT_1 \\ dT_{12} \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{34} \\ dT_4 \\ dT_5 \\ dT_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{H_{si}}{C_{si}} & \frac{H_{si}}{C_{si}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_{si}}{C_i} & -\frac{(H_{si} + H_i)}{C_i} & \frac{H_i}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_i}{C_i} & -\frac{(H_i + H_1)}{C_i} & \frac{H_1}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_1}{C_{12}} & -\frac{(H_1 + H_2)}{C_{12}} & \frac{H_2}{C_{12}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_2}{C_2} & -\frac{(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} & -\frac{(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_{34}} & -\frac{(H_4 + H_5)}{C_{34}} & \frac{H_5}{C_{34}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_4} & -\frac{(H_5 + H_6)}{C_4} & \frac{H_6}{C_4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_6}{C_5} & -\frac{(H_6 + H_7)}{C_5} & \frac{H_7}{C_5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_7}{C_6} & -\frac{(H_7 + H_e)}{C_6} & \frac{H_e}{C_6} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{si} \\ T_1 \\ T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} -1 \\ \frac{1}{C_{si}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt$$

$$\begin{bmatrix} T_{si}^m \\ T_1^m \\ T_{12}^m \\ T_2^m \\ T_3^m \\ T_{34}^m \\ T_4^m \\ T_5^m \\ T_6^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{si} \\ T_1 \\ T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} + [e]$$

En laTabla D.9 y en la Tabla D.10 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.12 a Figura D.14.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_{si}	100	250	500	4.51E+02	1.79E+01	98.661	0	-0.0031
C_{si}	100	1000	2000	9.74E+02	2.55E+01	18.004	-0.0024	0.0039
C_i	1	50	100	6.85E+01	9.99E+00	10.185	-0.0033	0.0035
H_i	1	50	100	9.36E+00	9.68E-01	47.982	0.0041	0
C₁	10	500	1000	1.23E+02	6.10E+00	85.100	0.0028	0.0015
H₁	1	10	500	4.85E+01	5.52E+00	5.321	0	0.0017
H₂	1	10	500	2.57E+02	5.18E+00	54.802	0	0
C₁₂	10	500	1000	2.59E+02	1.42E+01	37.528	0.0033	0.0049
C₂	10	500	1000	2.09E+02	4.29E+01	11.222	0.0041	-0.0013
H₃	10	50	100	3.95E+01	2.29E+00	92.672	-0.0029	0
C₃	100	1000	2000	7.80E+02	8.76E+00	17.834	0	0
H₄	10	100	500	6.16E+01	6.95E+00	80.000	0	-0.0026
C₃₄	100	1000	2000	6.90E+02	5.34E+01	4.022	-0.0018	-0.0040
H₅	10	100	500	1.73E+02	2.73E+01	74.625	0	-0.0035
C₄	100	1000	2000	4.58E+02	5.71E+01	31.524	-0.0043	0.0040
H₆	1	10	50	1.10E+01	6.07E-02	82.766	0	0.0048
C₅	1	50	200	2.92E+01	1.02E+01	77.668	0.0019	0.0029
H₇	1	10	50	1.18E+01	4.48E-01	40.436	0.0032	0
C₆	1	50	200	7.98E+01	7.07E+00	70.768	0.0048	-0.0025
H_e	10	200	500	1.95E+02	2.16E+01	36.760	0.0019	0
A₁	1	4	7	5.91E+00	5.78E-01	50.879	0	-0.0035

Tabla D.9 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo del muro base con aislamiento

	H_{si}	C_{si}	C_i	H_i	C_1	H_1	H_2	C_{12}	C_2	H_3	C_3	H_4	C_{34}	H_5	C_4	H_6	C_5	H_7	C_6	H_e	A_1	
H_{si}	1																					
C_{si}	-0.3	1																				
C_i	0.1	0.4	1																			
H_i	0.0	-0.3	-0.2	1																		
C_1	0.3	0.1	0.5	0.4	1																	
H_1	0.0	0.1	-0.5	0.0	0.1	1																
H_2	0.2	0.4	-0.3	0.4	-0.3	0.2	1															
C_{12}	-0.1	0.4	0.0	0.3	0.2	0.2	-0.1	1														
C_2	0.2	0.5	-0.3	0.1	0.3	-0.3	0.5	0.0	1													
H_3	0.0	0.0	0.4	0.4	0.4	0.4	-0.1	0.4	0.3	1												
C_3	0.5	0.0	0.3	0.4	-0.1	0.1	0.2	-0.3	-0.1	0.2	1											
H_4	-0.2	0.2	-0.2	-0.4	0.4	0.3	-0.3	0.1	-0.3	0.2	-0.4	1										
C_{34}	0.1	-0.4	-0.1	0.5	0.1	0.3	-0.3	-0.3	0.4	0.0	-0.2	-0.2	1									
H_5	-0.3	0.4	-0.2	0.1	0.0	0.3	0.0	0.2	-0.2	-0.4	0.1	-0.3	-0.1	1								
C_4	0.2	-0.4	-0.3	-0.4	0.2	-0.1	0.2	-0.3	0.4	-0.1	0.4	0.2	0.4	0.1	1							
H_6	-0.3	-0.3	0.2	0.2	0.2	-0.4	-0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.0	-0.3	0.5	0.0	1						
C_5	-0.3	0.0	0.5	0.4	-0.5	0.1	0.3	0.0	-0.2	0.2	0.2	-0.1	-0.5	-0.1	0.5	0.4	1					
H_7	-0.1	0.2	-0.5	0.0	-0.1	0.2	0.1	-0.5	0.3	-0.3	0.3	0.5	-0.1	-0.1	0.4	0.5	-0.3	1				
C_6	0.2	-0.1	-0.1	-0.4	-0.2	-0.2	0.0	-0.5	-0.5	0.3	0.1	-0.3	0.0	0.2	-0.4	0.0	-0.3	-0.1	1			
H_e	0.4	0.3	0.1	0.0	0.3	-0.4	-0.3	0.1	0.4	0.0	0.4	0.4	0.2	-0.4	-0.3	-0.3	0.2	0.1	-0.4	1		
A_1	0.1	0.0	0.4	-0.1	0.0	-0.4	-0.2	0.1	0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.4	0.3	-0.1	0.1	-0.2	-0.2	0.4	1	

Tabla D.10 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo del muro base con aislamiento

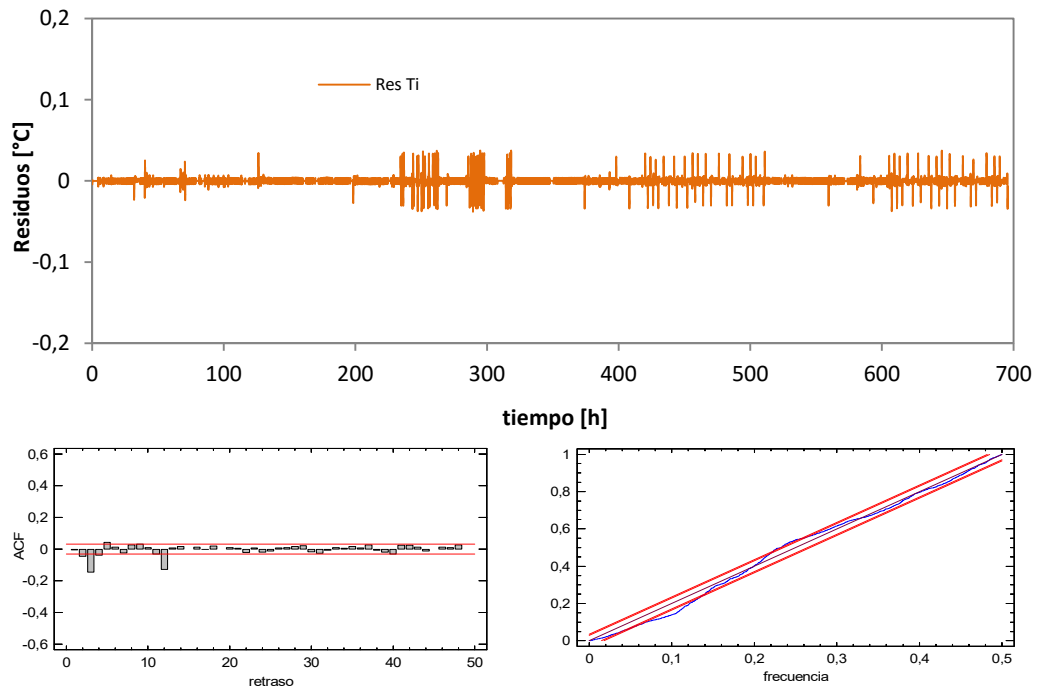


Figura D.12 – Ajuste del modelo completo del muro base con aislamiento

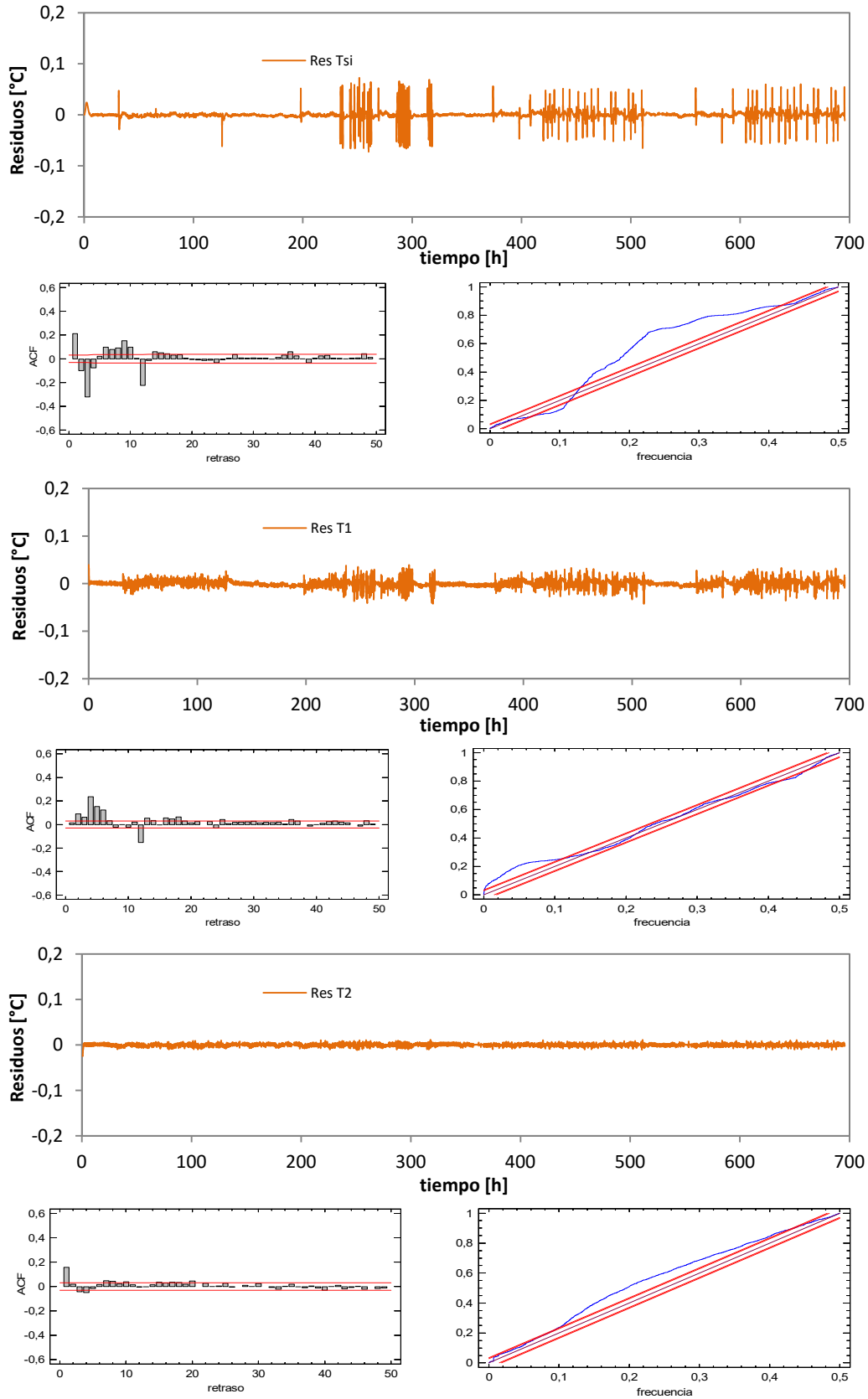


Figura D.13 – Ajuste del modelo completo del muro base con aislamiento

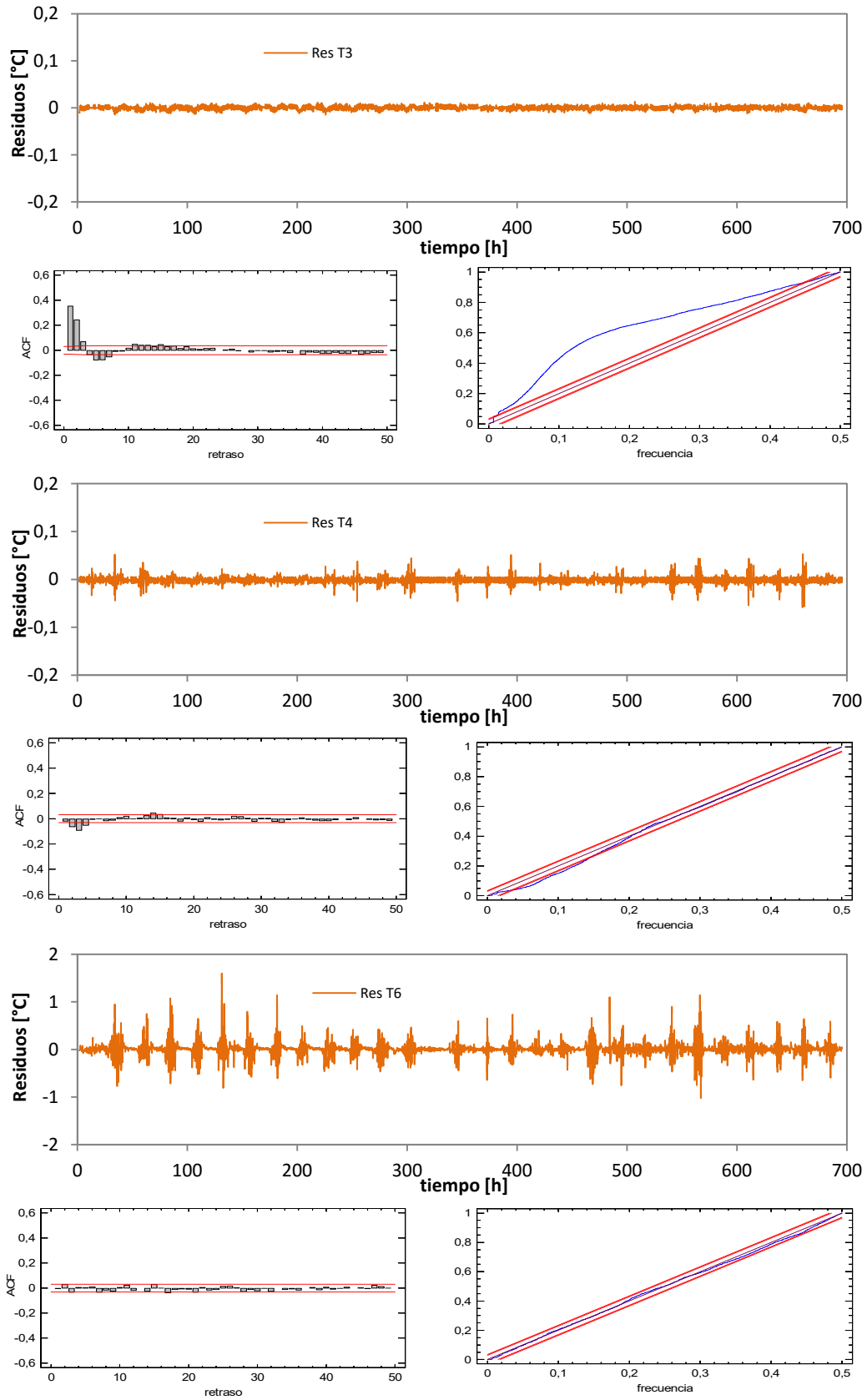


Figura D.14 – Ajuste del modelo completo del muro base con aislamiento

Una vez validado el proceso de identificación de parámetros se obtienen los resultados finales de propiedades térmicas de cada capa de la muestra recogidos en la Tabla D.11.

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0.177	8.9	C _{tab}	0.049	10.7
R _{ca}	0.183	5.5	C _{perf}	0.160	6.2
R _{perf}	0.159	11.1	C _{SATE}	0.009	15.9
R _{SATE}	1.271	2.0	C_{total}	0.218	7.6
R_{total}	1.790	3.8			

Tabla D.11 – Propiedades térmicas por capa del modelo de celda para el muro base con aislamiento

D.3 Modelo de fachada ventilada

El modelado del comportamiento térmico de la fachada ventilada es el apartado más complejo de la parte experimental. En las probetas de muro base las propiedades térmicas de la muestra permanecen constantes, sin embargo, para la fachada ventilada el proceso de convección varía la respuesta de la probeta en función de las condiciones de temperatura y radiación exteriores. El desarrollo del proceso de modelado de dichas fachadas activas es el hito más representativo de la segunda parte del presente trabajo de investigación. El modelado de la fachada ventilada se divide en dos pasos. El primero consiste en obtener los valores eficientes de las propiedades del flujo de aire en la cámara ventilada para las temperaturas y para las velocidades. Este objetivo se obtiene mediante el empleo de un modelo de volúmenes finitos definido en una herramienta de CFD. Una vez obtenidos los valores eficientes se pasa a definir un modelo en parámetros concentrados que permite reproducir el comportamiento de la fachada para, asu vez, emplearlo en un software de simulación a escala de edificio. A continuación se muestra los cálculos correspondientes a dichas fases de modelado de la probeta de fachada ventilada.

D.3.1 Modelo CFD

En el apartado 5.2.2 de la memoria se define las características del modelo de CFD empleado para el estudio de la cámara de aire ventilada. Se muestran las características del mallado, el cual se a estudiado de forma paramétrica en base al tamaño de celda de forma que se obtienen los mismos resultados con el menor número posible de elementos. Y se emplean zonas de mayor definición para las cápas límite. También se definen los modelos de flotación, turbulencia, etc..., empleados. Pero aunque el modelo converja y se optimice en sus propiedades siempre es necesario validar los resultados con los datos experimentales. Este paso final es complejo de conseguir, ya que en la mayoría de casos no se disponen de dichos datos a

escala de probeta real como es el caso del ensayo *PASLINK*. Este es un aspecto a favor de la metodología de ensayo empleada frente a otros estudios sobre el comportamiento energético de fachadas ventiladas. El paso de validación es un paso complejo y costoso, ya que los primeros resultados se suelen alejar de los datos experimentales, lo que implica un proceso iterativo de ajuste, que debido al coste computacional de los modelos de *CFD* se alarga en el tiempo, exigiendo muchas horas de tratamiento de datos. Por ejemplo, el modelo estudiado tarda del orden de un día en resolver de forma dinámica el intervalo de tiempo empleado de 5 días.

Una vez obtenidos los resultados es necesario postprocesar los datos y compararlos con los valores equivalentes medidos en el ensayo. En función de las divergencias se ajustan las propiedades del modelo, y se repite el proceso hasta obtener resultados válidos. En el siguiente apartado se muestran los resultados de ajuste finales obtenidos para el modelo de *CFD*.

D.3.1.1 Ajuste del modelo con datos experimentales

En la Figura D.15 y Figura D.16 se muestra la comparativa entre los resultados del modelo respecto a los valores medidos para las velocidades en la cámara de aire ventilada. La validación de un modelo cuando existe un número de puntos y variables de contraste elevado es compleja. En este caso se ha tomado como mejor modelo el que reduce el error medio ponderado de velocidades y temperaturas dando mayor relevancia a los datos correspondientes a la zona central de la muestra, ya que en la zona de entrada y salida se generan condiciones particulares de turbulencia que afectan a la propia medida experimental y difieren del comportamiento promedio de la muestra en general.

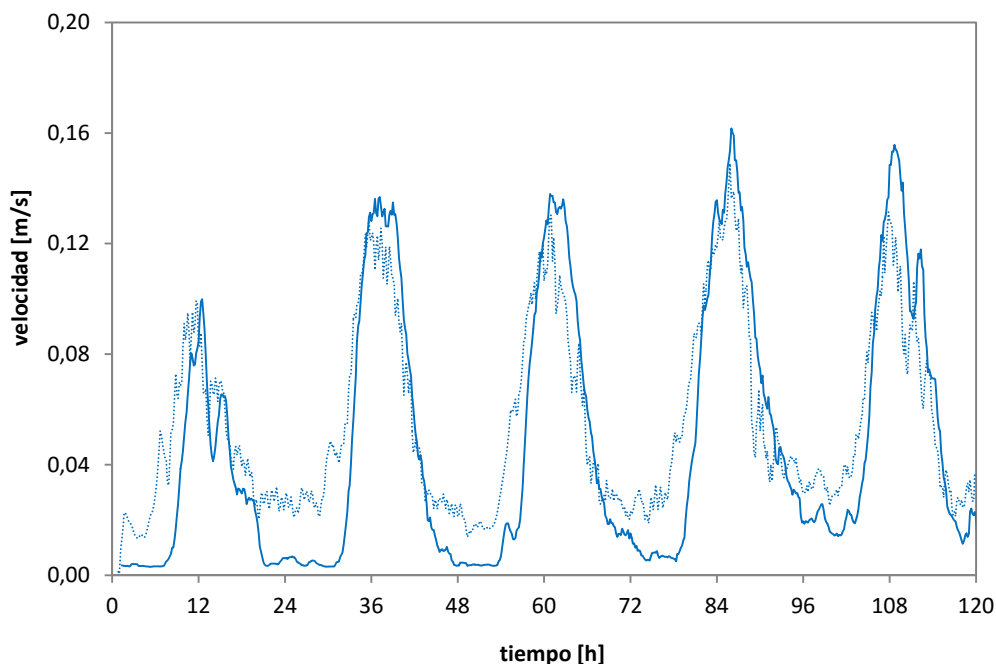


Figura D.15 –Validación del modelo *CFD* para las velocidades en la cámara ventilada

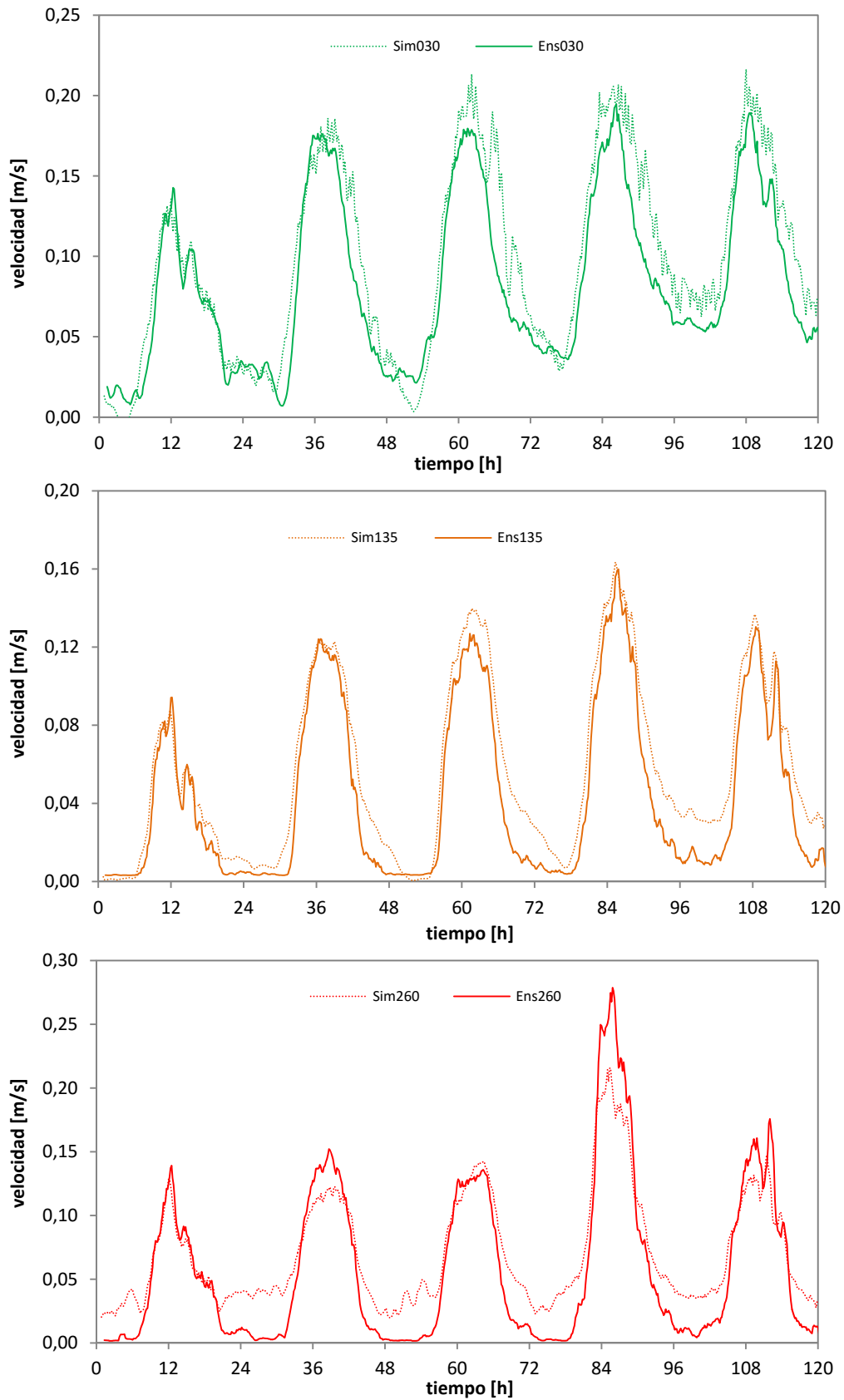


Figura D.16 –Validación del modelo CFD para las velocidades en la cámara ventilada

En la Figura D.17 y Figura D.18 se muestra el ajuste para temperaturas del aire en la cámara ventilada. El ajuste de las variables del aire dentro de la cámara ventilada es el aspecto más complicado. El modelo físico-matemático de la cámara de aire es el componente que mayor grado de definición necesita y donde mayor número de hipótesis de cálculo y simplificaciones se aplican. Por tanto, se considera que el ajuste obtenido es muy correcto y válido para realizar el estudio posterior de factores eficientes.

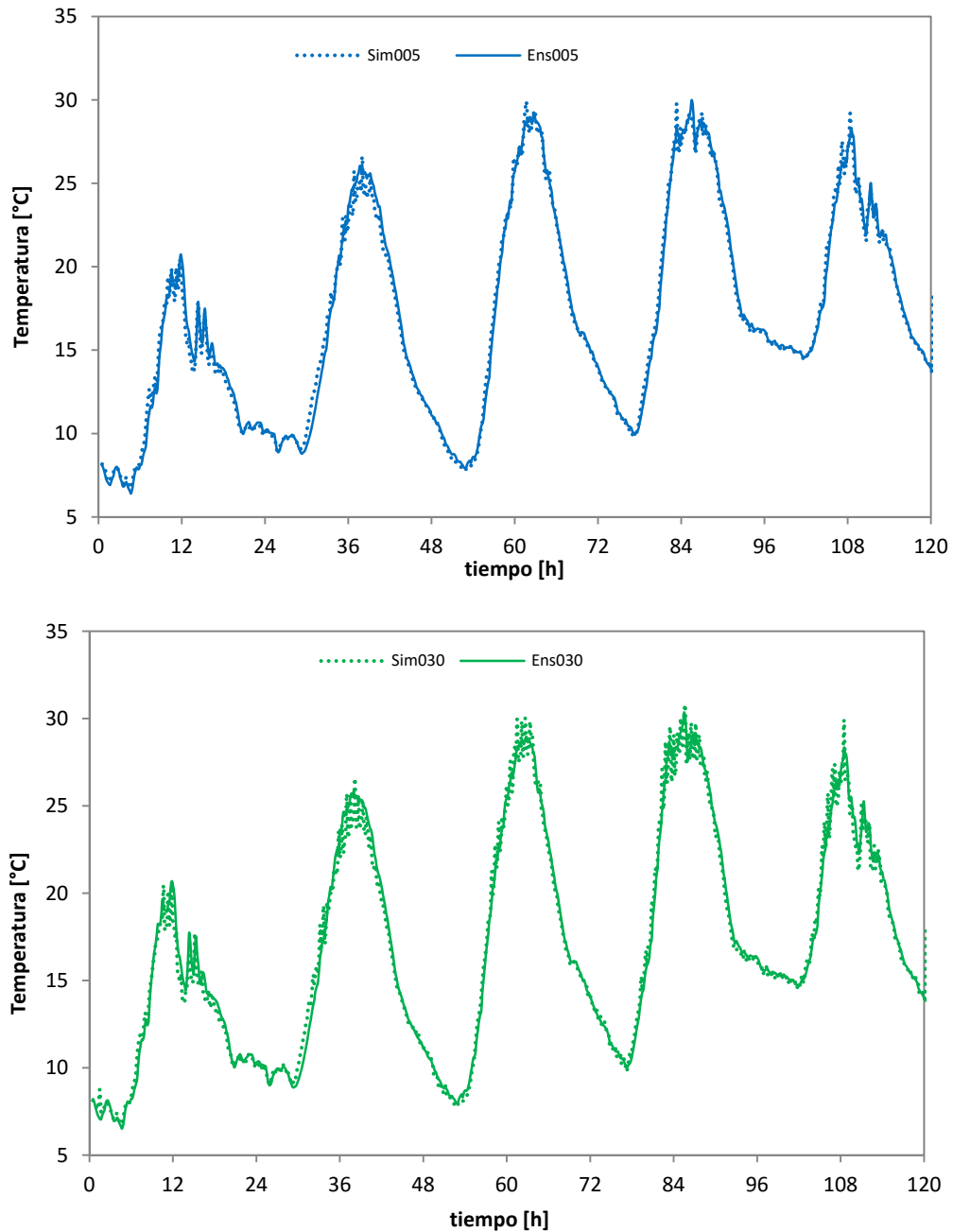


Figura D.17 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la cámara ventilada

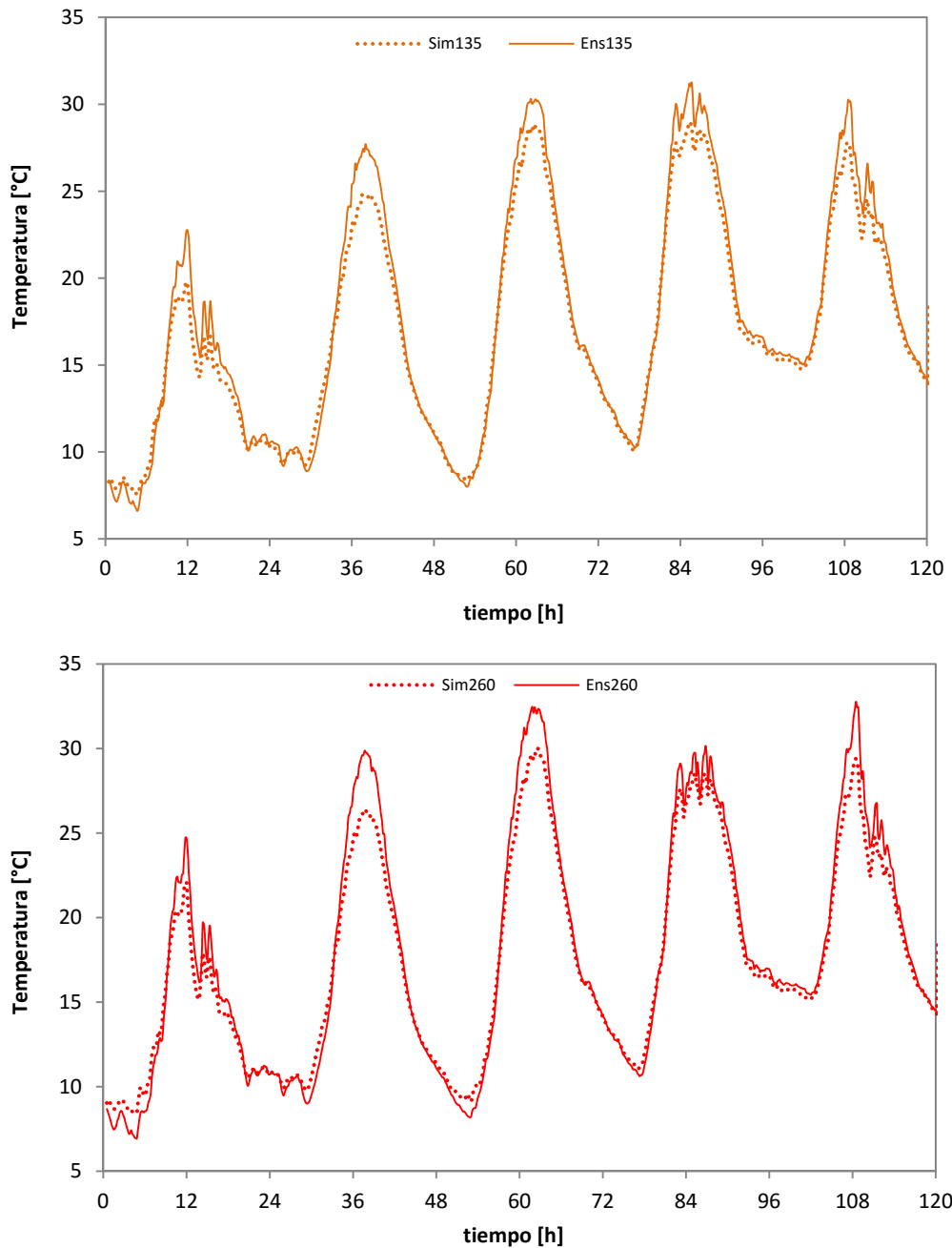


Figura D.18 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la cámara ventilada

Una vez contrastadas las variables del aire en la cámara ventilada se muestran los resultados para las temperaturas de las superficies que la conforman y para la superficie exterior de la fachada. En la Figura D.19 y en la Figura D.20 se muestra la comparativa entre los valores del modelo y experimentales de las temperaturas de la superficie del aislamiento que corresponde con la superficie interior de la cámara de aire definida como *Capa 5* de la muestra.

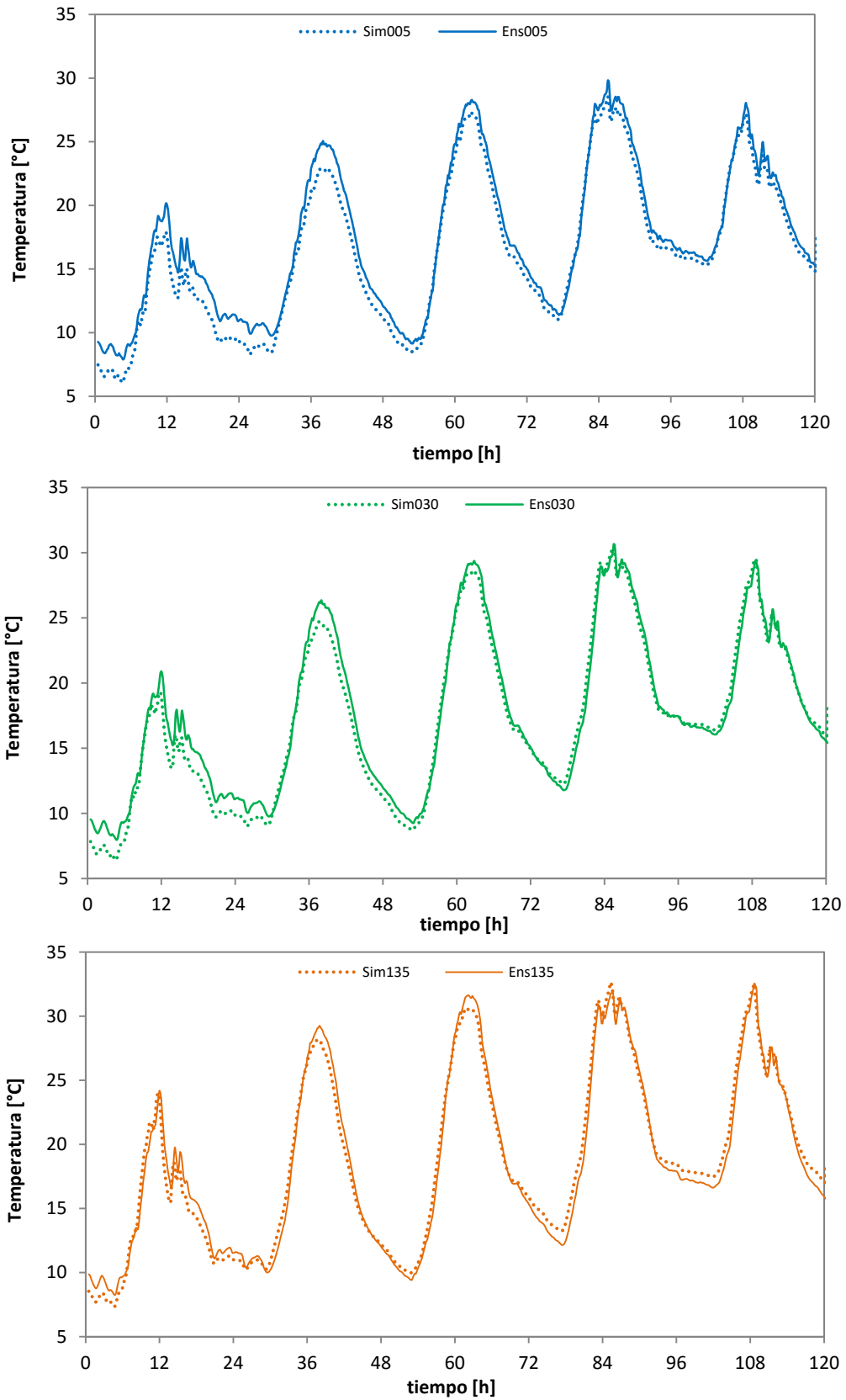


Figura D.19 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la capa 5, superficie aislante

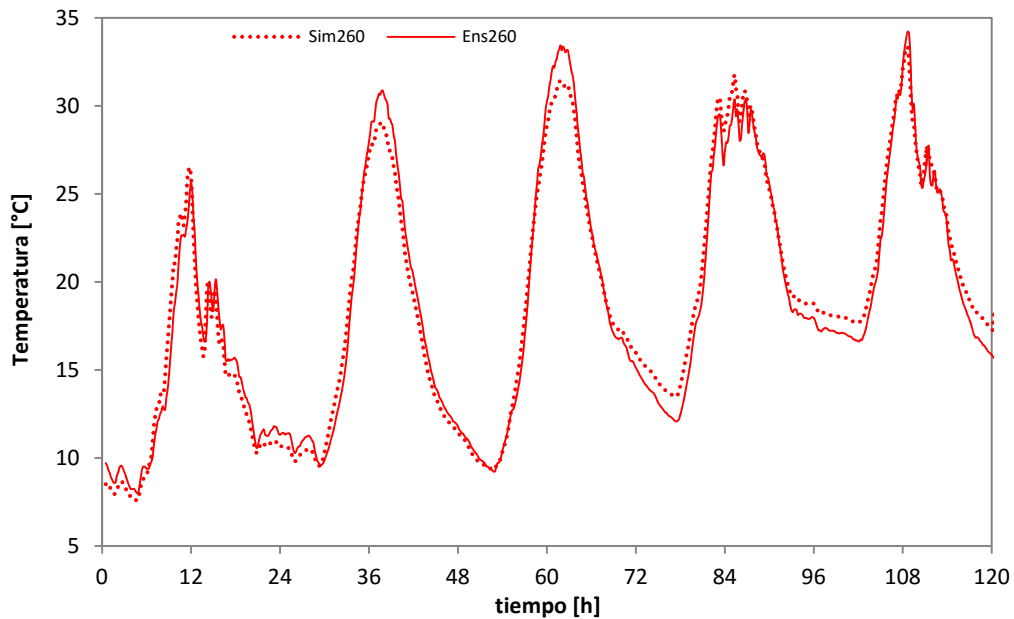


Figura D.20 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la capa 5, superficie aislante

De igual forma, en la Figura D.21 y en la Figura D.22 se muestra la comparativa para las temperaturas de la superficie de la placa de cemento, que configura la cara exterior de la cámara ventilada, y que se define como *Capa 6* en el esquema de la probeta.

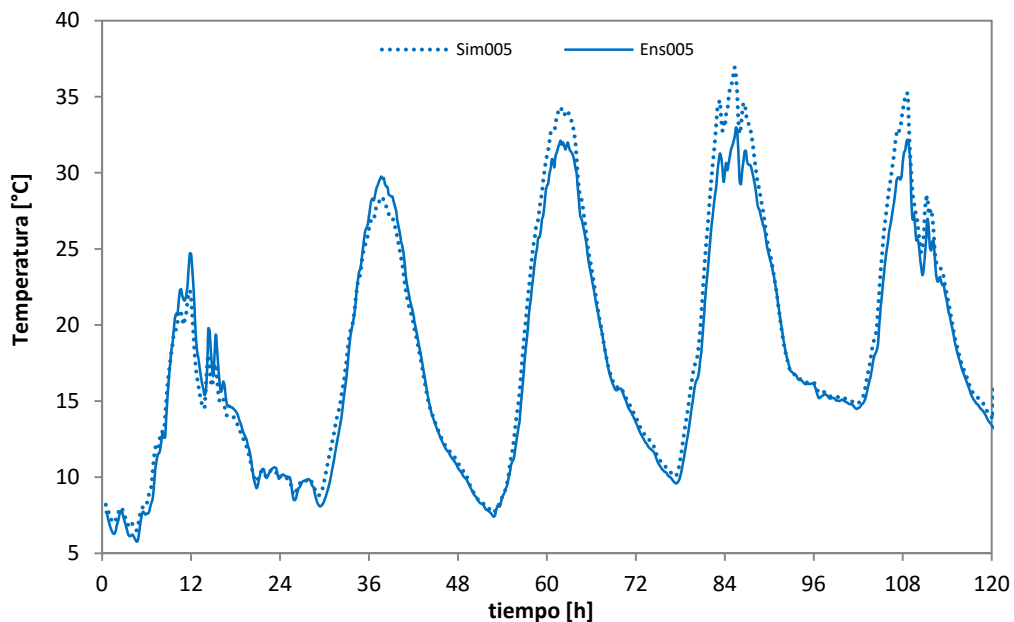


Figura D.21 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la capa 6, superficie placa de cemento

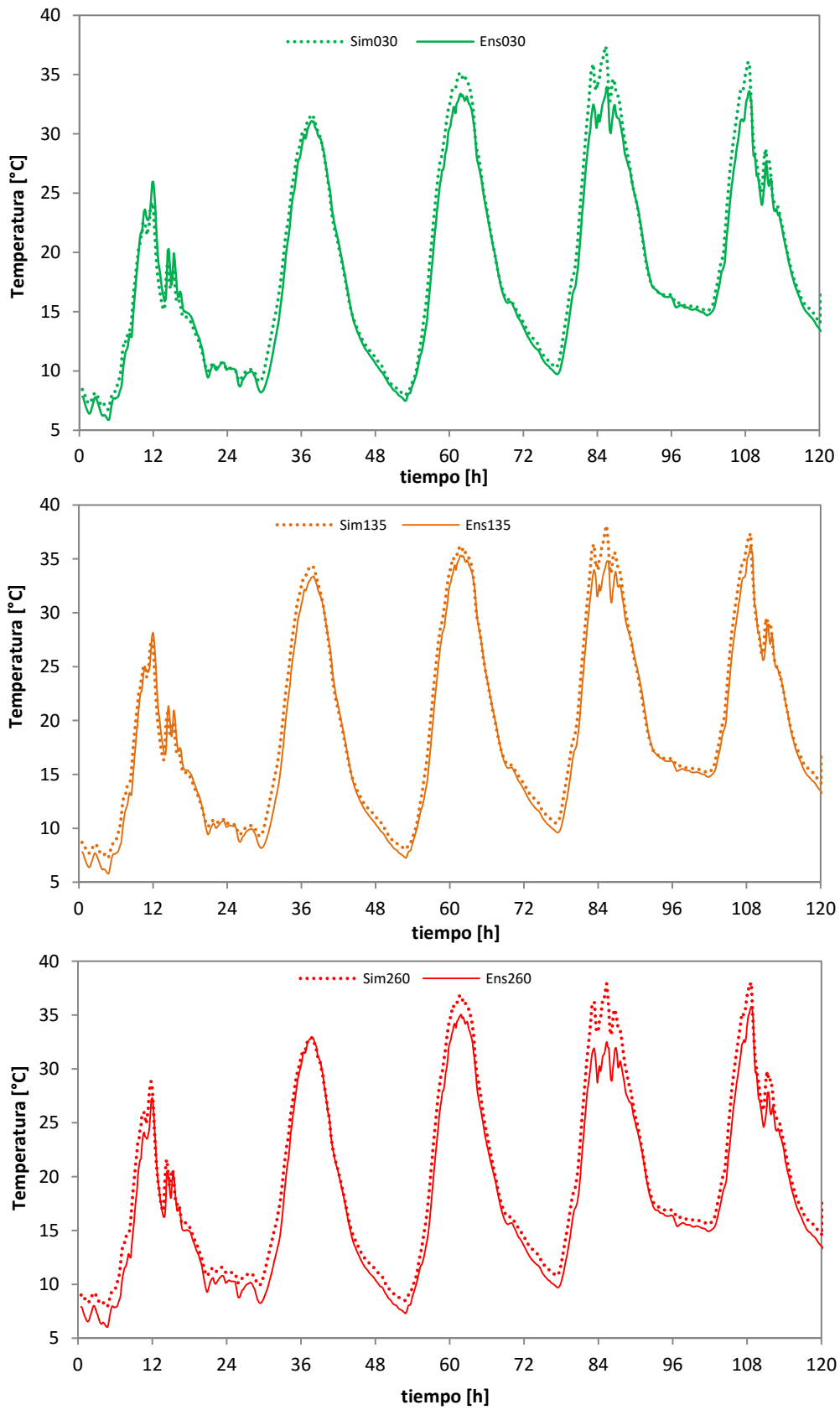


Figura D.22 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la capa 6, superficie placa de cemento

En la Tabla D.12 se recogen los errores medios obtenidos para cada una de las variables y cada punto de medida obtenidos.

Error Abs Velocidad [m/s]				
Altura [m]				
	0,05	0,30	1,35	2,60
FV-L	0,02	0,03	0,02	0,04

Error Abs Temperatura [°C]					
Altura [m]					
Capa		0,05	0,30	1,35	2,60
FV-L	5	1,0	0,8	0,8	0,9
	ca	0,4	0,5	0,8	0,9
	6	0,9	0,9	0,9	1,4

Tabla D.12 – Error absoluto de los modelos de volúmenes finitos en las dos tipologías de fachada ventilada

En la memoria, en el apartado de validación del modelo de CFD, se muestran una serie de imágenes correspondientes a los campos de temperaturas y velocidades del aire para cuatro instantes de tiempo representativos del comportamiento de la fachada ventilada. Por extensión del documento dichas imágenes se muestran en un tamaño reducido, a continuación se muestran con más detalla, de forma que se puede apreciar con más calidad la información del comportamiento de las diferentes capas de la muestra.

En la Figura D.23 y en la Figura D.24 se puede ver el comportamiento de la fachada a medido día, cuando la incidencia solar calienta la placa exterior de cemento que comienza a generar el proceso de flotación del aire dentro de la cámara ventilada. Pero aun está muy fría la superficie del aislante, de forma que el movimiento es lento y progresivo. En la Figura D.25 y en la Figura D.26 se muestra el estado de la fachada hacia el final de la tarde, cuando comienza a remitir la incidencia solar, de forma que la placa exterior comienza a enfriarse y la superficie del aislante pasa a ser la más caliente, pero debido a la inercia del movimiento, las velocidades siguen siendo continuas y con perfiles homogéneos.

En la Figura D.27 y en la Figura D.28 se muestra el estado correspondiente a la media noche, instante en el que se están enfriando por completo todas las superficies de la fachada y empieza a frenarse el movimiento de aire dentro de la cámara ventilada. Por último, en la Figura D.29 y en la Figura D.30 se muestra el instante de tiempo del amanecer, momento más fría del día, en el que el movimiento ascendente del aire es prácticamente nulo ó con zonas de reflujó y velocidades de descenso en la proximidad de la placa de cemento.

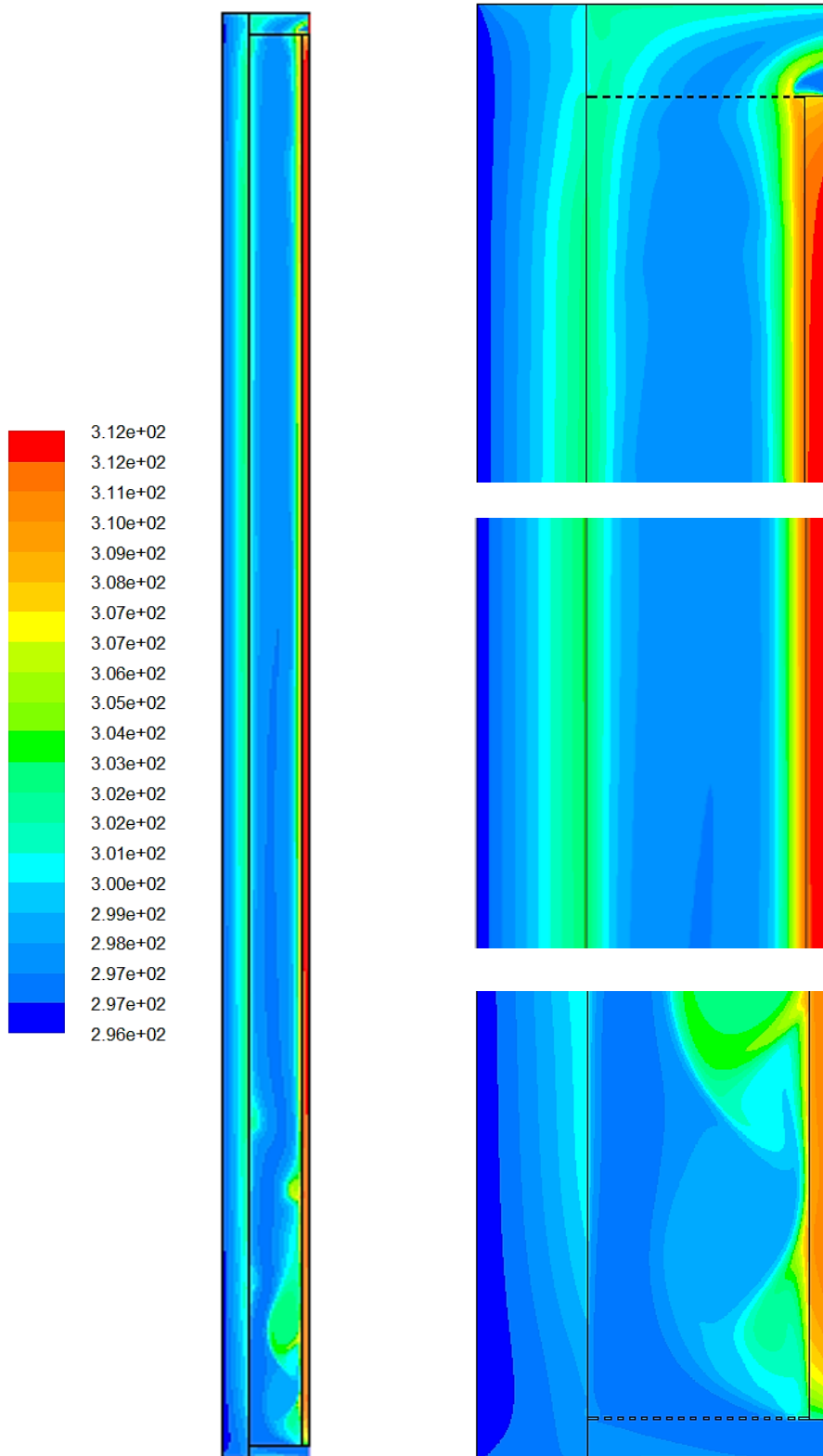


Figura D.23 –Campo de temperaturas para el instante de tiempo $t = 60$ [h]

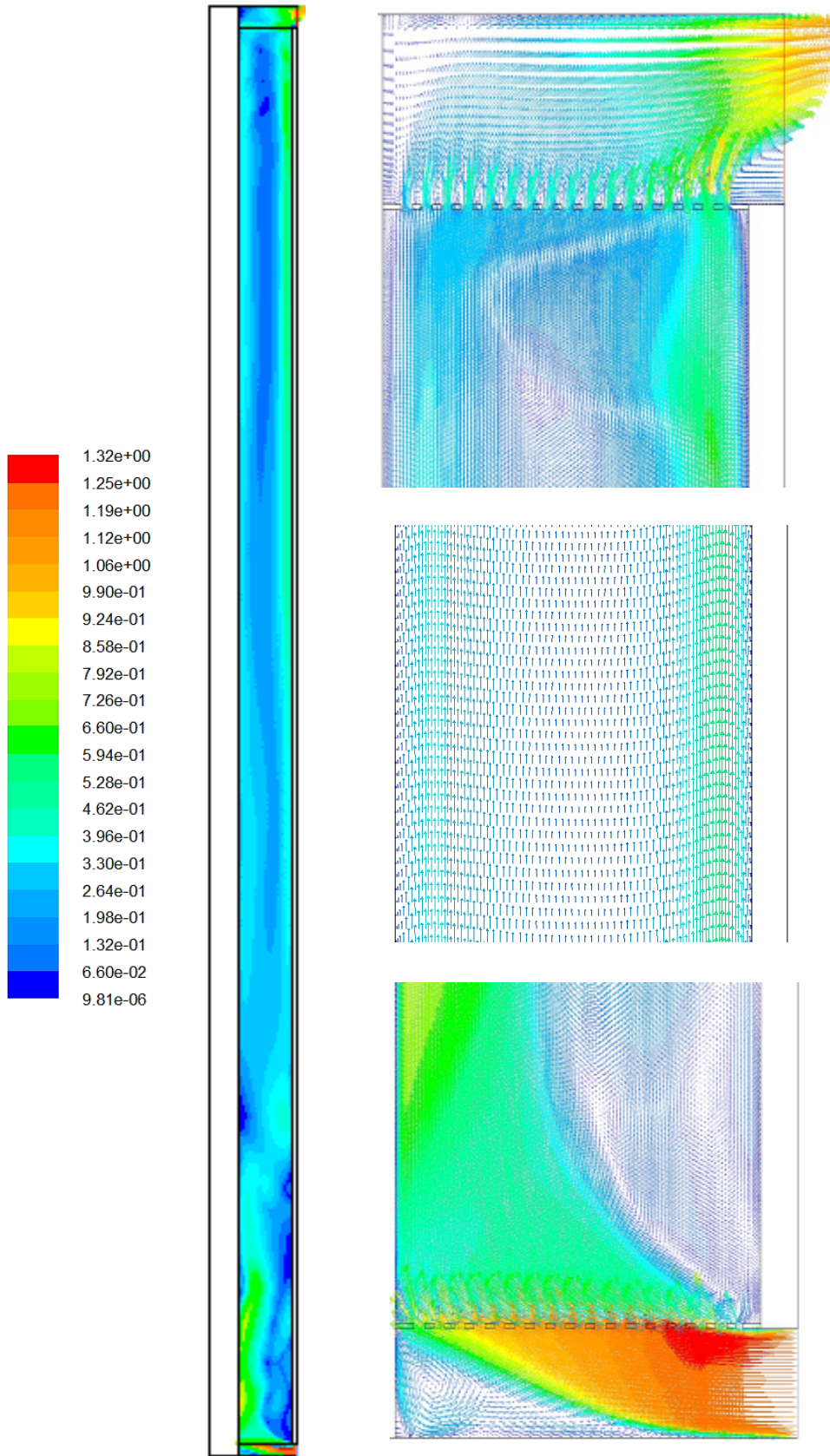


Figura D.24 –Campo de velocidades para el instante de tiempo $t = 60$ [h]

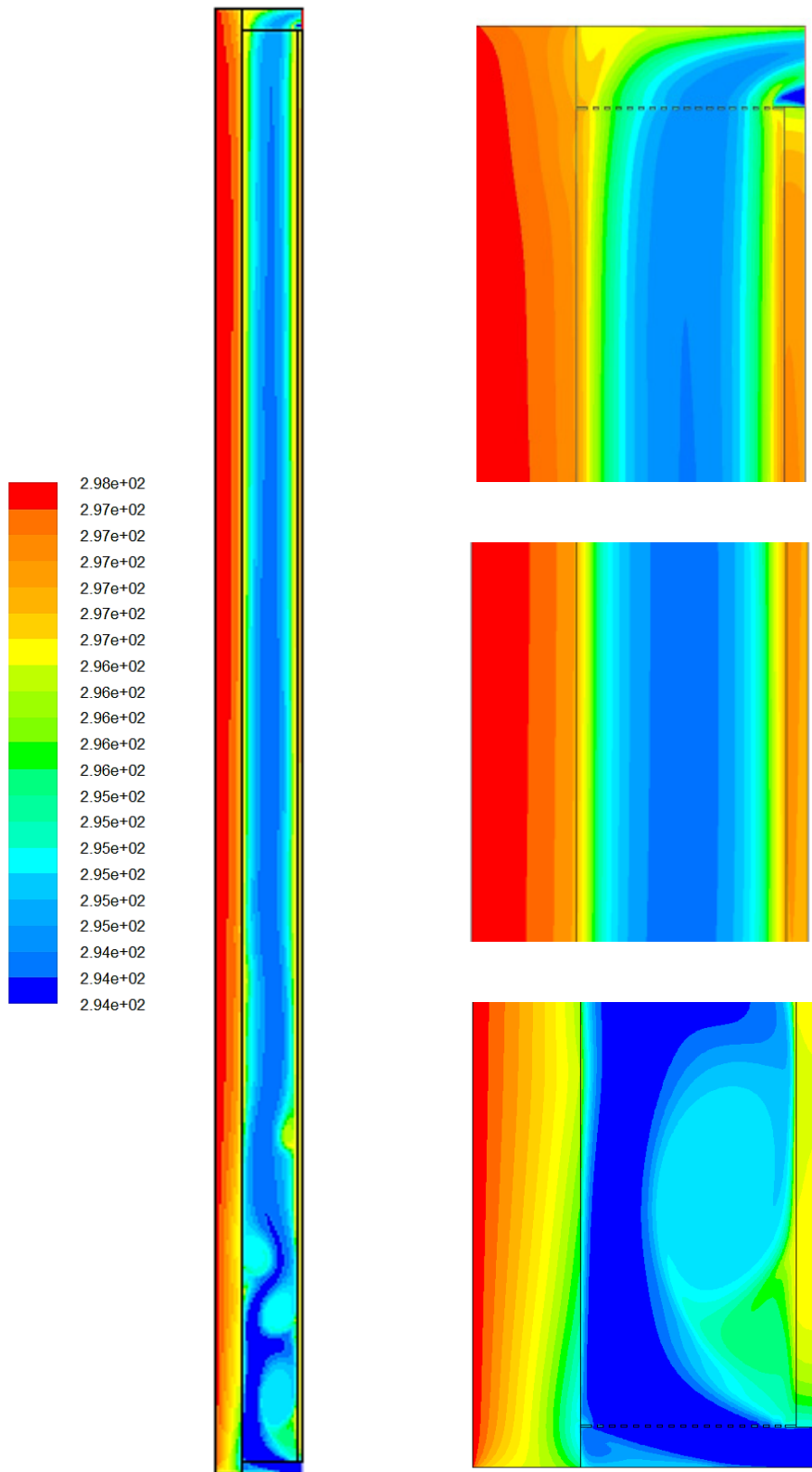


Figura D.25 –Campo de temperaturas para el instante de tiempo $t = 66$ [h]

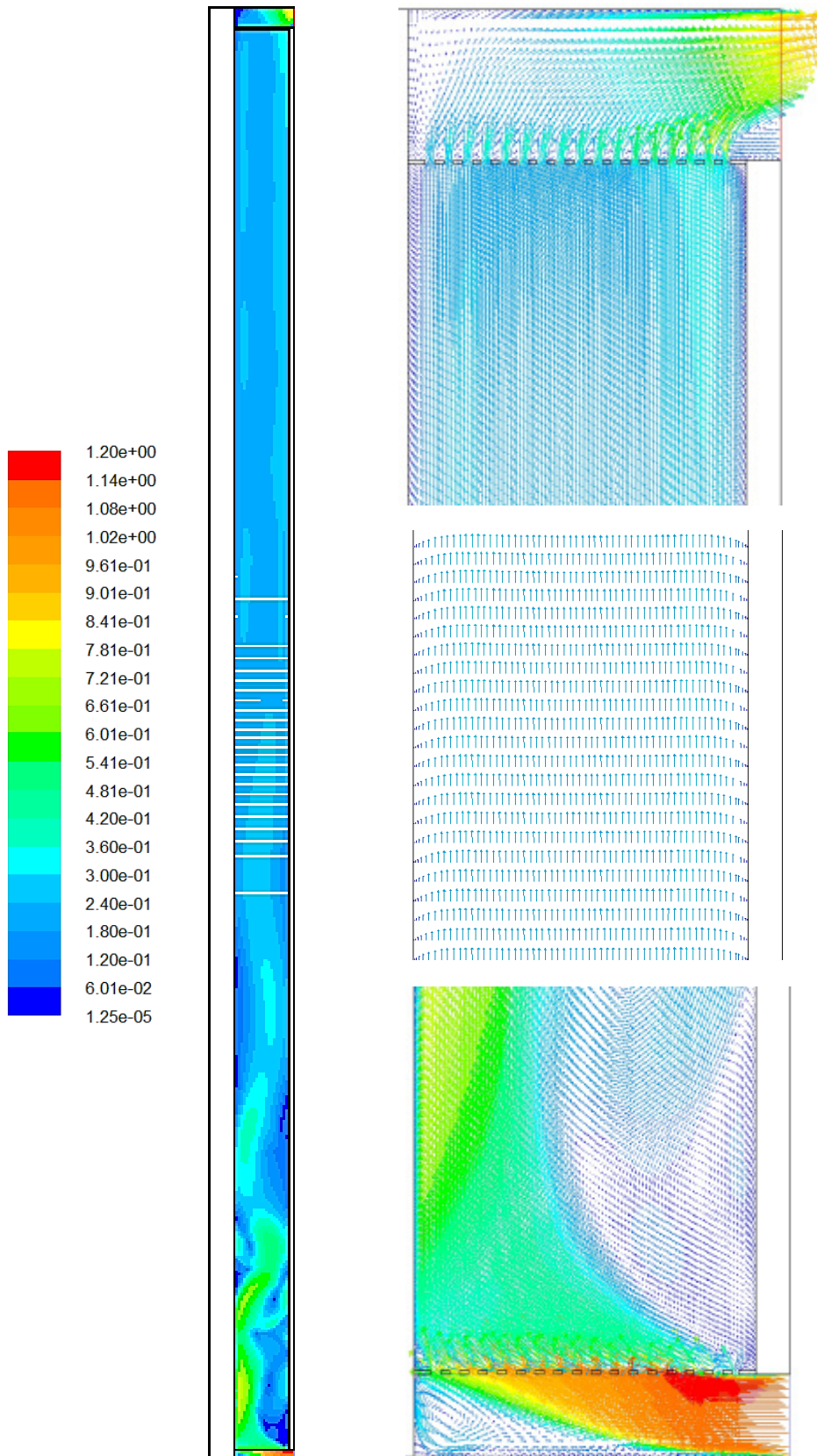


Figura D.26 –Campo de velocidades para el instante de tiempo $t = 66$ [h]

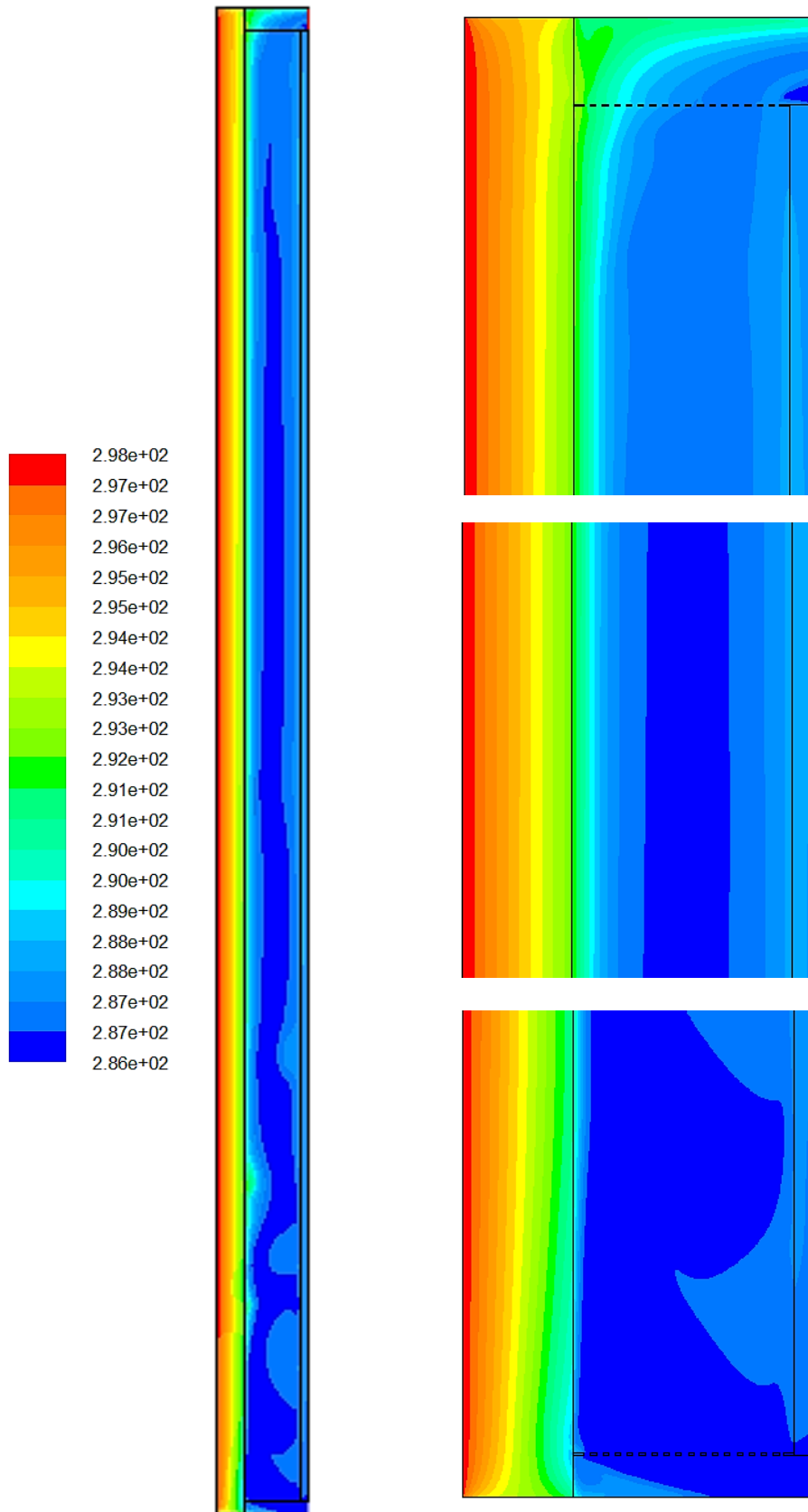


Figura D.27 –Campo de temperaturas para el instante de tiempo $t = 72$ [h]

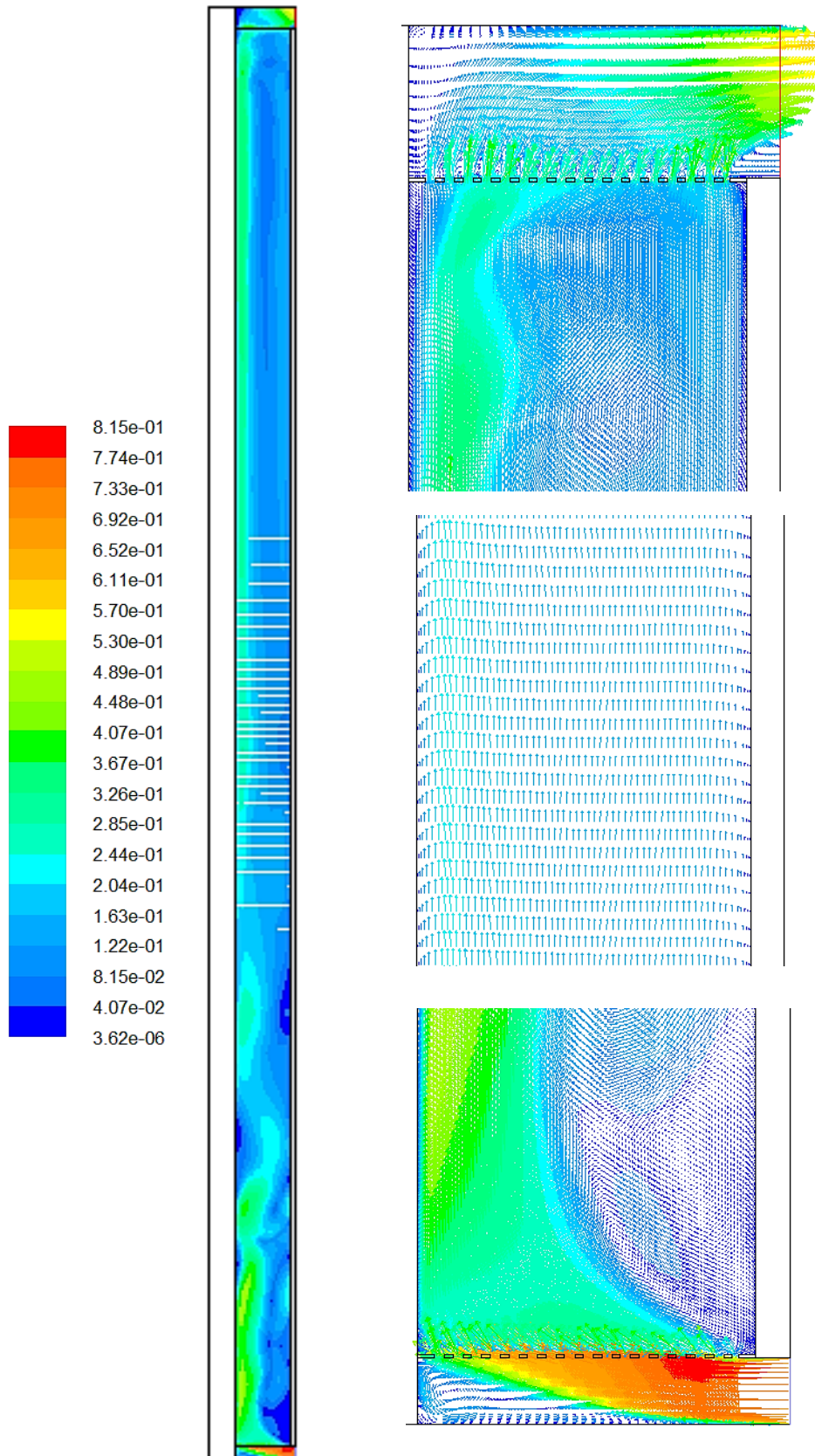


Figura D.28 –Campo de velocidades para el instante de tiempo $t = 72$ [h]

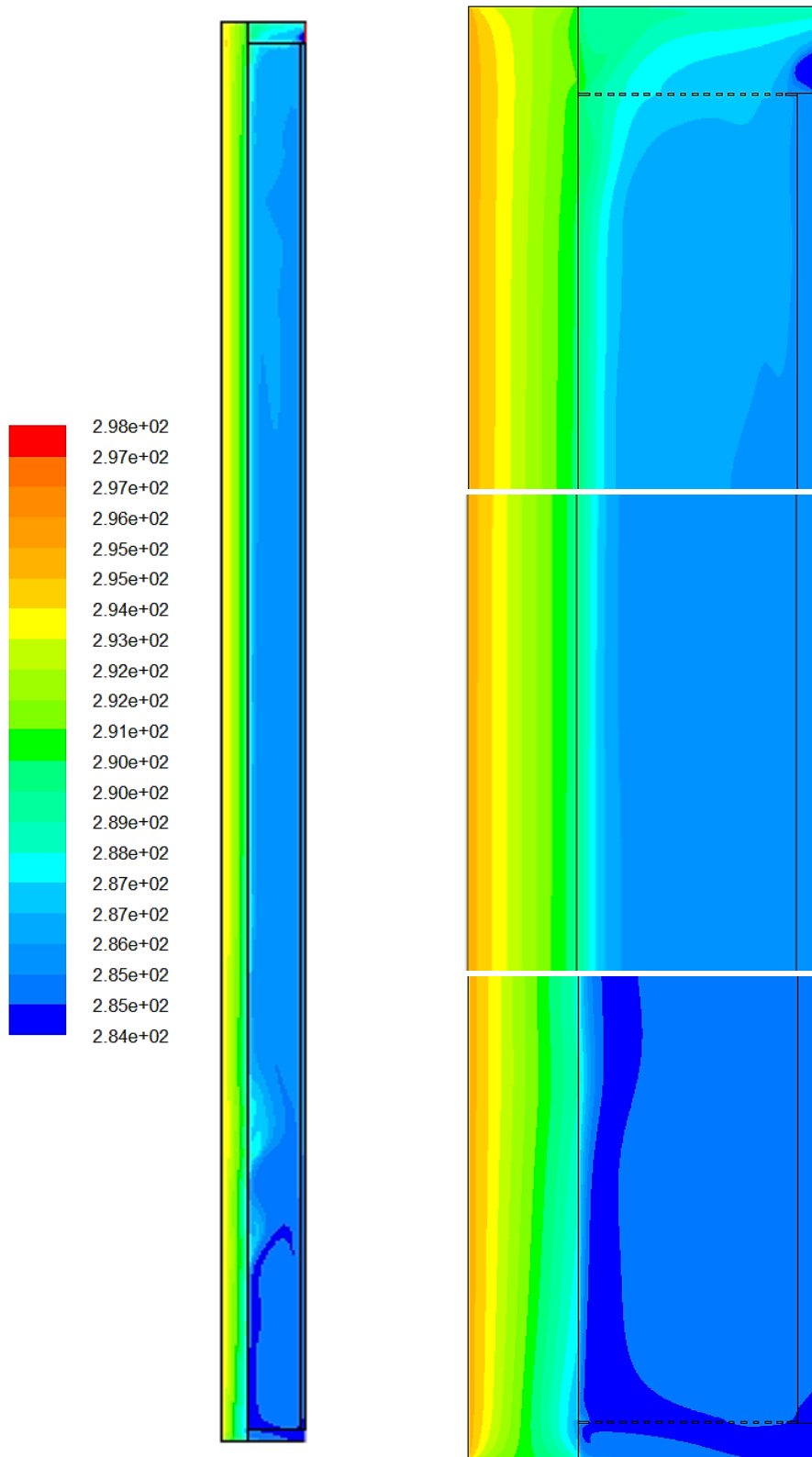


Figura D.29 –Campo de temperaturas para el instante de tiempo $t = 78$ [h]

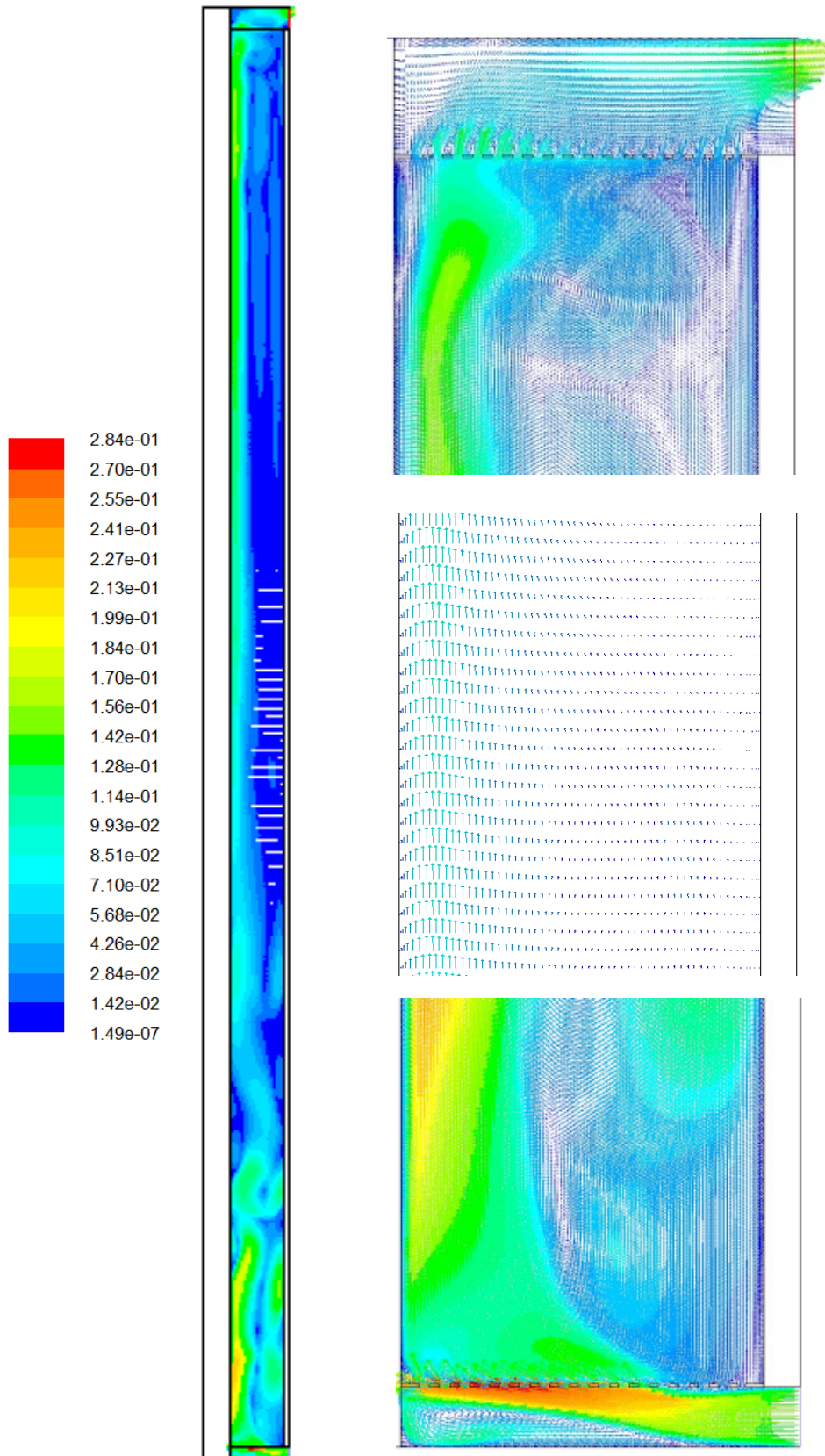


Figura D.30 –Campo de velocidades para el instante de tiempo $t = 78$ [h]

D.3.1.2 Factores de paso a valores eficientes de variables de ensayo

En la Tabla D.13 y Tabla D.14 se recogen las condiciones de temperatura y velocidad. En la columna f_{va} se indica el factor de corrección de la velocidad medida respecto a la velocidad eficiente, obtenida de integrar el perfil de velocidades en toda la sección de la cámara ventilada. Se incluyen todos los resultados disponibles, que se corresponden con 60 instantes de tiempo, obtenidos de analizar los datos cada dos horas en los cinco días en los que se ha realizado la simulación en CFD.

instante [h]	T_{ext} [°C]	T_{ca} [°C]	T_{c5} [°C]	T_{c6} [°C]	u_{135} [m/s]	Γ	f_{va}	e_{fva} [%]
2	7.63	8.23	9.41	7.79	0.004	-1.372	1.06	0.4
4	6.70	6.74	8.15	5.98	0.003	-1.536	1.07	1.4
6	9.65	8.87	9.75	8.15	0.003	-1.821	1.07	1.2
8	12.28	12.74	13.00	12.76	0.013	-0.927	1.06	0.5
10	17.37	20.66	20.17	23.49	0.095	1.174	1.06	0.3
12	14.55	19.30	20.41	22.56	0.070	0.659	1.05	0.6
14	14.41	18.15	18.72	20.44	0.086	0.747	1.05	1.1
16	13.29	15.70	16.29	16.61	0.038	0.357	1.04	2.1
18	12.14	13.79	14.44	14.10	0.029	-0.526	1.07	1.4
20	9.89	10.50	11.44	10.04	0.004	-1.498	1.04	1.3
22	10.03	10.63	11.36	10.25	0.004	-1.527	1.06	0.5
24	9.62	10.45	11.29	10.26	0.004	-1.221	1.05	0.9
26	9.28	9.73	10.55	9.29	0.003	-1.527	1.06	0.3
28	9.44	9.85	10.74	9.49	0.003	-1.404	1.06	0.0
30	11.76	10.00	10.59	9.34	0.003	-2.122	1.06	0.6
32	15.53	14.42	14.36	14.70	0.051	1.224	1.07	1.2
34	18.04	20.95	21.27	24.28	0.088	0.905	1.05	1.2
36	19.79	26.05	26.41	30.49	0.135	0.917	1.04	1.6
38	21.52	26.94	27.46	31.00	0.115	0.871	1.05	0.9
40	20.73	24.17	24.20	25.91	0.103	0.979	1.06	0.5
42	18.09	19.33	19.49	19.46	0.042	-0.158	1.03	3.2
44	14.06	14.42	14.97	14.02	0.010	-1.742	1.05	0.4
46	11.86	12.20	12.90	11.63	0.006	-1.830	1.05	1.1
48	10.62	10.79	11.67	10.16	0.003	-1.712	1.08	1.8
50	8.29	9.16	10.32	8.59	0.003	-1.489	1.07	0.8
52	7.43	8.18	9.41	7.54	0.003	-1.513	1.04	1.3
54	8.03	9.34	10.54	9.56	0.004	-0.822	1.06	0.0
56	14.81	14.55	14.69	14.90	0.040	0.603	1.06	0.2
58	20.44	22.90	22.90	25.97	0.100	1.002	1.07	1.5

Tabla D.13 – Factores de corrección de la velocidad en la cámara ventilada

instante [h]	T_{ext} [°C]	T_{ca} [°C]	T_{c5} [°C]	T_{c6} [°C]	u_{135} [m/s]	Γ	f_{va}	e_{fva} [%]
60	24.04	27.90	28.52	32.26	0.107	0.859	1.06	0.2
62	26.43	29.81	30.38	33.31	0.125	0.837	1.04	1.3
64	24.19	26.43	26.77	28.00	0.095	0.780	1.05	0.5
66	21.04	21.79	22.13	22.00	0.033	-0.392	1.06	0.1
68	16.55	17.16	17.84	16.75	0.011	-1.611	1.06	0.1
70	14.93	15.54	16.39	15.20	0.008	-1.401	1.08	1.6
72	13.07	13.57	14.69	13.04	0.009	-1.472	1.08	2.0
74	11.58	12.15	13.51	11.59	0.005	-1.408	1.06	0.6
76	9.86	10.68	12.23	10.08	0.004	-1.387	1.04	1.5
78	11.99	11.91	13.09	11.37	0.011	-1.461	1.05	1.1
80	16.25	16.72	17.41	17.32	0.037	-0.126	1.05	0.9
82	23.46	25.98	26.00	28.99	0.111	0.992	1.05	0.5
84	25.47	28.56	28.72	31.13	0.147	0.937	1.07	0.7
86	26.03	29.00	29.27	31.42	0.138	0.889	1.07	1.3
88	25.30	27.20	27.48	28.19	0.110	0.711	1.07	1.5
90	21.86	23.48	24.09	23.87	0.058	-0.367	1.05	0.6
92	16.88	17.97	19.05	17.82	0.030	-1.137	1.06	0.2
94	15.67	16.60	17.77	16.41	0.021	-1.163	1.08	1.6
96	15.28	15.95	17.17	15.55	0.009	-1.331	1.05	1.0
98	14.80	15.65	16.89	15.37	0.010	-1.231	1.07	0.8
100	14.45	15.33	16.59	15.09	0.009	-1.191	1.06	0.5
102	14.41	15.27	16.44	14.99	0.013	-1.246	1.06	0.2
104	16.98	18.30	19.17	18.97	0.032	-0.226	1.04	2.0
106	22.52	25.38	26.14	28.63	0.112	0.766	1.07	0.9
108	25.47	29.91	30.87	34.20	0.135	0.776	1.07	1.0
110	20.15	23.38	24.41	24.89	0.070	0.314	1.05	1.0
112	19.69	23.05	24.11	24.48	0.065	0.261	1.05	0.5
114	19.13	20.50	21.27	20.57	0.041	-0.911	1.06	0.2
116	16.35	17.04	18.21	16.51	0.017	-1.450	1.06	0.2
118	14.64	15.23	16.53	14.55	0.020	-1.521	1.07	1.4
120	13.37	13.96	15.49	13.28	0.008	-1.445	1.06	0.0

Tabla D.14 – Factores de corrección de la velocidad en la cámara ventilada

D.3.2 Modelo de parámetros concentrados

En la Figura D.31 se muestra el modelo empleado para analizar el comportamiento completo de la fachada ventilada ligera. En la parte superior se muestra la parte correspondiente al muro base con aislamiento, de forma que su definición es idéntica a la del modelo de la Figura D.11, salvo que en este caso la capa de aislamiento no presenta el revestimiento superficial de mortero de la fachada exterior. Y en la parte inferior se muestra la parte del modelo que reproduce el comportamiento de la cámara ventilada y de la placa ligera exterior de cemento, hasta las condiciones ambientales exteriores.

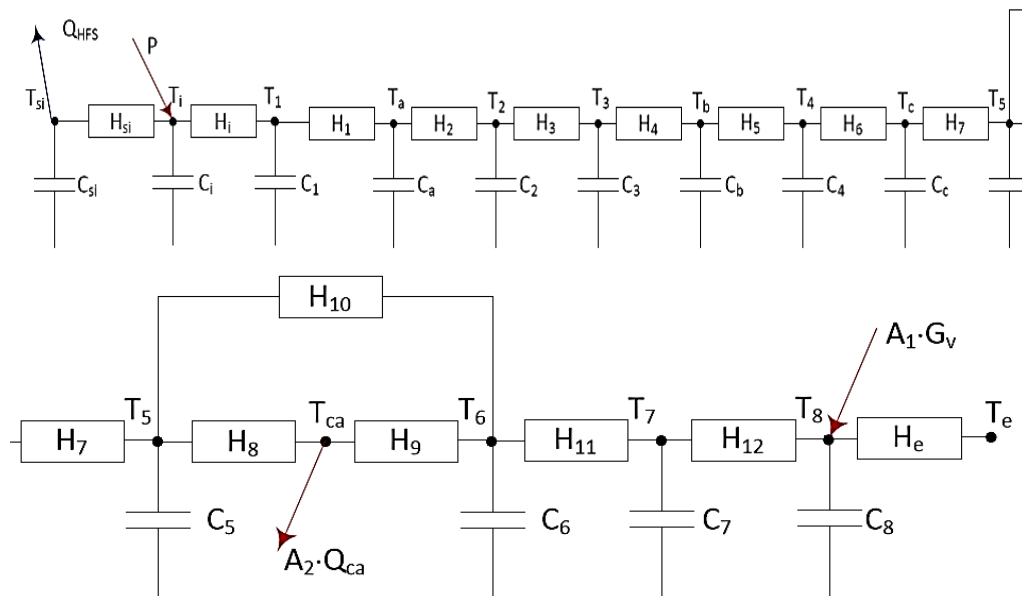


Figura D.31 – Modelo de celda para el muro base con la fachada ventilada ligera

Se trata del modelo más complejo que se resuelve en el presente trabajo de tesis, debido al orden orden, lo que implica un elevado número de variables, parámetros y funciones objetivo. Además, a esta complejidad hay que sumarle que las conductancias que representan el comportamiento de la cámara de aire ventilada son variables en el tiempo, dependiendo de la velocidad y temperaturas del aire y de las superficies que la conforman. Este aspecto se resuelve incluyendo en el modelo las ecuaciones algebraicas necesarias para representar ese comportamiento y pasando a variables de ajuste los coeficientes de dichas ecuaciones. Esto exige introducir como datos de entrada al modelo la velocidad medida de aire, v_{ca} , y el coeficiente de radiación entre superficies, H_{rad} . Las ecuaciones del modelo se muestran en [D.9], [D.10] y [D.11]. La resolución de un modelo de estas características con las herramientas de identificación de parámetros es muy compleja. Exige ir resolviendo el modelo de forma progresiva, es decir, primero se define una parte del modelo, se obtienen resultados fiables, se fijan, se amplía el modelo para obtener los resultados de las variables ampliadas, que se toman como valor inicial para una nueva resolución, esta vez con toda la parte del modelo variable. Este proceso se repite progresivamente hasta obtener un modelo completo en el cual todas las variables son libres, pero que parte de un estado inicial muy próximo a los valores definitivos de las variables que lo conforman.

$$\begin{bmatrix} T_{si}^m \\ T_i^m \\ T_1^m \\ T_2^m \\ T_3^m \\ T_4^m \\ T_5^m \\ T_6^m \\ T_8^m \\ Q_{ca}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{si} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_8 \\ H_8 \\ H_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_{ca} \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} + [e] \quad [D.10]$$

$$H_8 = a_8 + b_8 \cdot v_{ca}$$

$$H_9 = a_9 + b_9 \cdot v_{ca} \quad [D.11]$$

$$H_{10} = P_0 \cdot H_{rad}$$

En la Tabla D.15 a Tabla D.18 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.32 y Figura D.33.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
a₈	1	100	2000	1.31E+01	6.34E-01	48.5608	-0.0049	-0.0036
b₈	1	100	2000	9.50E+02	9.36E+01	79.0844	-0.0017	-0.0047
a₉	1	100	2000	2.84E+01	9.17E-01	96.0135	-0.0001	0.0031
b₉	1	100	2000	7.85E+02	2.51E+01	51.4528	-0.0043	-0.0005
P₀	10	500	1000	7.79E+00	1.12E+00	11.0639	-0.0007	-0.0001
H_{si}	100	250	500	4.58E+02	4.34E+01	86.7457	-0.0026	0.0027
C_{si}	100	1000	2000	8.40E+02	3.83E+01	7.9084	0.0028	0.0024
H_i	1	50	100	3.68E+01	2.38E+00	88.1855	-0.0005	-0.0035
C_i	1	50	100	8.57E+01	6.55E+00	5.8316	0.0015	0.0008
H₁	10	500	1000	1.02E+02	6.38E+00	35.7495	0.0029	0.0022
C₁	1	10	500	7.57E+01	1.20E+01	62.9888	-0.0021	0.0028
C_a	1	10	500	3.56E+02	1.30E+01	79.9540	0.0017	-0.0014
H₂	10	500	1000	6.74E+01	4.24E+00	81.4567	-0.0015	-0.0019
C₂	1	10	500	1.10E+02	3.60E+01	51.0349	-0.0004	-0.0022
H₃	10	500	1000	3.95E+01	4.56E+00	44.6598	0.0027	-0.0014
C₃	1	10	500	2.97E+02	8.97E+00	33.4197	-0.0011	0.0032
H₄	10	500	1000	7.73E+01	5.52E+00	64.0312	0.0022	-0.0007
C_b	1	10	500	1.18E+03	6.36E+00	33.6482	0.0037	0.0028
H₅	10	500	1000	9.94E+01	3.37E+00	92.4759	0.0047	0.0034
C₄	1	10	500	4.78E+02	1.37E+02	32.3152	-0.0008	0.0008
H₆	1	50	200	1.44E+01	7.67E-01	24.7100	0.0043	0.0013
C_c	1	50	200	4.57E+01	3.42E+00	21.8883	-0.0037	0.0006
H₇	1	50	200	1.15E+01	1.80E-01	7.8362	0.0006	0.0016
C₅	1	50	200	4.32E+00	8.12E+00	89.7410	-0.0026	0.0045
C₆	1	50	500	4.90E+01	8.88E-01	47.4623	0.0023	0.0028
H₁₁	100	1000	2000	6.56E+02	8.65E+00	26.8465	-0.0018	-0.0005

Tabla D.15 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo de fachada ventilada ligera

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
C ₇	1	50	500	1.79E+02	3.87E+01	0.813	-0.0014	0.0031
H ₁₂	100	1000	2000	1.52E+02	2.59E+01	91.552	-0.0016	-0.0009
C ₈	1	50	500	4.85E+01	2.19E+01	96.571	-0.0002	-0.0001
H _e	1	150	300	1.77E+02	1.74E+01	42.453	0.0002	0.0013
A ₁	1	5	7	5.86E+00	5.09E-01	95.385	-0.0018	0.0001
A ₂	0.9	1	1.1	1.07E+00	5.74E-02	74.214	-0.0025	0.0044

Tabla D.16 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo de fachada ventilada ligera

	a ₈	b ₈	a ₉	b ₉	P ₀	H _{si}	C _{si}	H _i	C _i	H ₁	C ₁	C _a	H ₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C _b	H ₅	C ₄	H ₆	C _c	
a ₈	1																						
b ₈	0.3	1																					
a ₉	-0.1	-0.5	1																				
b ₉	-0.4	0.0	0.1	1																			
P ₀	-0.2	0.1	-0.3	0.0	1																		
H _{si}	-0.4	0.4	0.0	0.1	0.2	1																	
C _{si}	-0.3	-0.1	-0.5	0.0	-0.4	-0.4	1																
H _i	-0.3	0.0	-0.2	-0.2	-0.5	-0.5	-0.2	1															
C _i	0.3	-0.4	0.1	0.0	0.4	-0.4	-0.1	0.4	1														
H ₁	0.1	0.0	0.3	0.1	0.3	-0.4	0.2	0.4	0.2	1													
C ₁	-0.5	-0.3	-0.1	-0.1	0.4	-0.5	0.4	-0.1	-0.2	0.4	1												
C _a	0.3	0.3	-0.3	-0.1	-0.2	0.3	0.2	0.3	0.1	0.0	-0.5	1											
H ₂	-0.3	-0.1	0.0	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3	0.1	-0.2	-0.2	-0.4	1										
C ₂	0.1	-0.3	0.4	0.0	-0.4	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.4	0.0	-0.4	-0.2	1									
H ₃	-0.3	0.1	0.4	-0.2	-0.2	-0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.4	-0.2	0.3	1								
C ₃	-0.2	-0.3	-0.1	-0.3	-0.3	0.2	0.4	0.0	-0.1	0.4	-0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.5	1							
H ₄	-0.1	0.2	-0.2	0.2	0.2	0.1	-0.1	0.0	0.3	-0.4	0.1	0.1	-0.4	-0.2	0.0	0.1	1						
C _b	0.1	-0.4	0.1	-0.1	-0.2	0.2	-0.1	-0.3	0.0	0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.4	0.2	-0.5	1					
H ₅	0.0	0.0	0.4	0.5	-0.3	0.0	-0.1	0.3	0.3	-0.5	-0.3	0.4	0.0	-0.4	0.3	0.0	0.1	0.1	1				
C ₄	0.0	-0.1	0.1	0.3	0.0	-0.3	0.0	0.4	0.3	-0.5	-0.2	-0.1	0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	0.3	1			
H ₆	0.4	0.2	-0.4	0.3	0.1	-0.4	-0.2	0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.1	-0.4	0.3	0.4	0.3	-0.3	-0.4	0.4	1		
C _c	0.4	-0.2	0.0	-0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	-0.5	0.3	0.2	0.5	0.4	-0.1	0.1	-0.4	-0.4	-0.1	-0.5	-0.4	0.5	1	
H ₇	-0.1	0.3	0.1	0.5	0.3	-0.2	-0.3	-0.5	-0.1	-0.2	-0.2	0.1	-0.1	0.5	0.0	-0.2	0.0	0.1	0.3	0.2	0.5	0.2	
C ₅	-0.5	0.5	0.2	-0.1	0.3	0.1	0.3	0.4	0.3	-0.3	-0.3	0.3	-0.5	-0.2	0.0	-0.2	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	
C ₆	0.4	-0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	-0.3	-0.2	0.0	-0.3	-0.5	-0.4	0.2	-0.5	-0.1	0.5	-0.2	-0.5	-0.2	-0.4	0.1	0.2	
H ₁₁	-0.2	-0.2	0.0	-0.1	0.1	0.2	0.1	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	0.5	0.2	-0.4	-0.1	-0.2	0.1	-0.4	-0.2	-0.3	0.3	-0.1	
C ₇	0.1	-0.4	0.0	0.2	-0.2	0.5	-0.3	0.4	0.5	0.5	-0.2	0.5	0.0	0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.3	0.1	
H ₁₂	-0.2	0.1	-0.2	0.2	0.4	0.1	-0.4	-0.1	0.1	-0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	-0.5	0.4	0.1	0.3	0.4	-0.2	0.3	0.4	
C ₈	-0.5	-0.4	0.2	-0.4	-0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	-0.4	0.4	-0.4	-0.5	0.5	0.4	0.4	0.0	0.2	0.3	0.2	-0.1	-0.4	
H _e	0.4	0.3	-0.5	0.4	0.1	-0.3	0.4	0.3	0.4	-0.5	0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	0.2	0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.1	0.4	
A ₁	-0.3	-0.1	0.4	-0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	-0.5	-0.4	-0.4	0.2	0.1	0.5	0.1	0.0	-0.4	0.1	0.2	-0.2	
A ₂	-0.3	-0.1	-0.4	-0.3	-0.5	0.1	0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	-0.3	-0.3	-0.1	-0.4	0.0	0.4	-0.4	-0.3	0.2	

Tabla D.17 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo de fachada ventilada ligera

	H ₇	C ₅	C ₆	H ₁₁	C ₇	H ₁₂	C ₈	H _e	A ₁	A ₂
H ₇	1									
C ₅	0.2	1								
C ₆	-0.5	-0.3	1							
H ₁₁	0.3	0.1	-0.5	1						
C ₇	0.0	0.3	-0.1	-0.3	1					
H ₁₂	-0.1	0.2	-0.4	0.0	-0.1	1				
C ₈	-0.2	0.4	-0.3	-0.2	0.2	0.1	1			
H _e	0.4	0.3	0.4	-0.5	0.3	0.1	0.5	1		
A ₁	-0.4	0.0	0.4	0.3	-0.4	-0.2	-0.3	0.3	1	
A ₂	0.2	0.2	0.5	0.5	0.1	-0.1	0.3	0.4	0.3	1

Tabla D.18 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo de fachada ventilada ligera

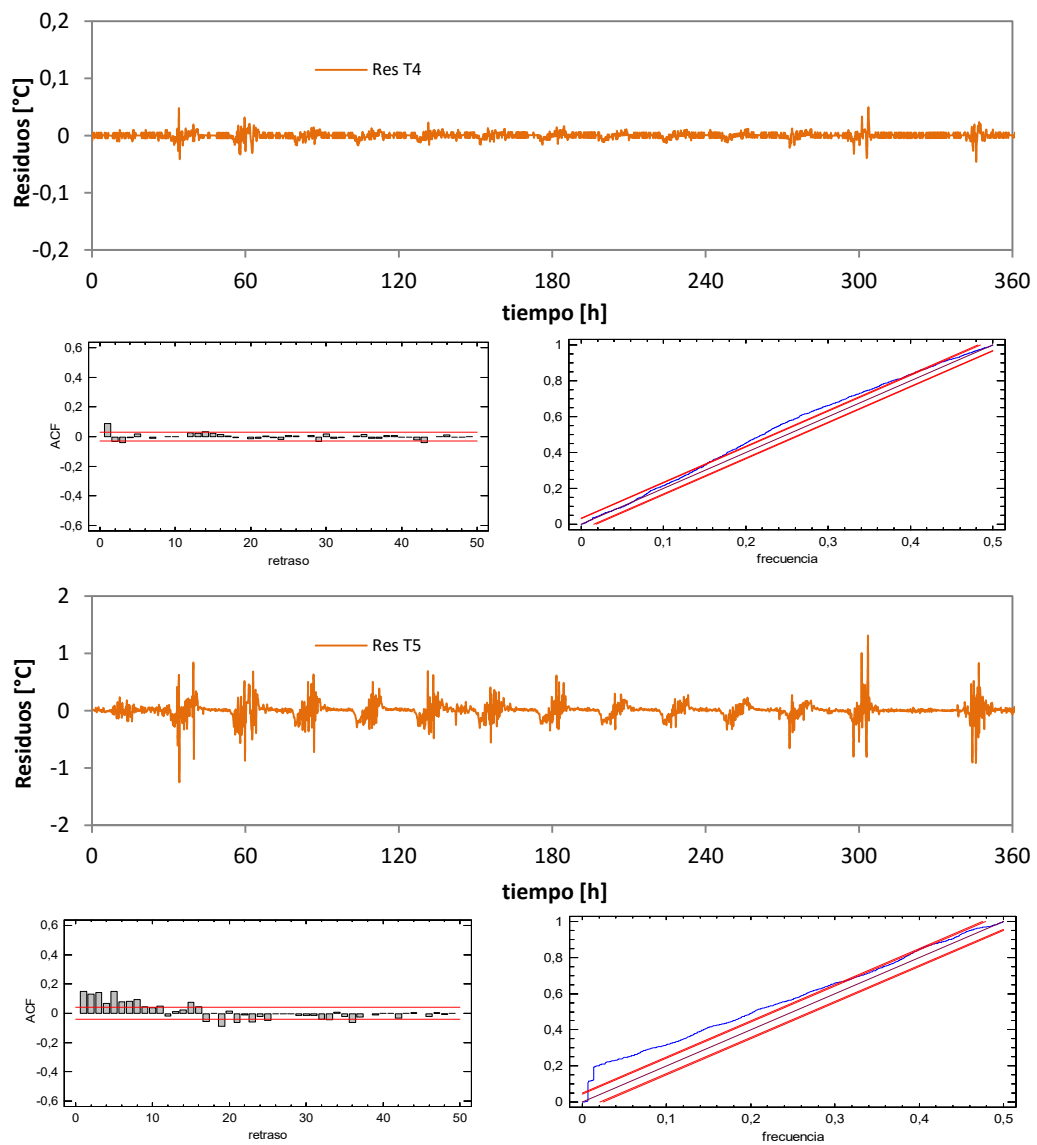


Figura D.32 – Ajuste del modelo completo de fachada ventilada ligera

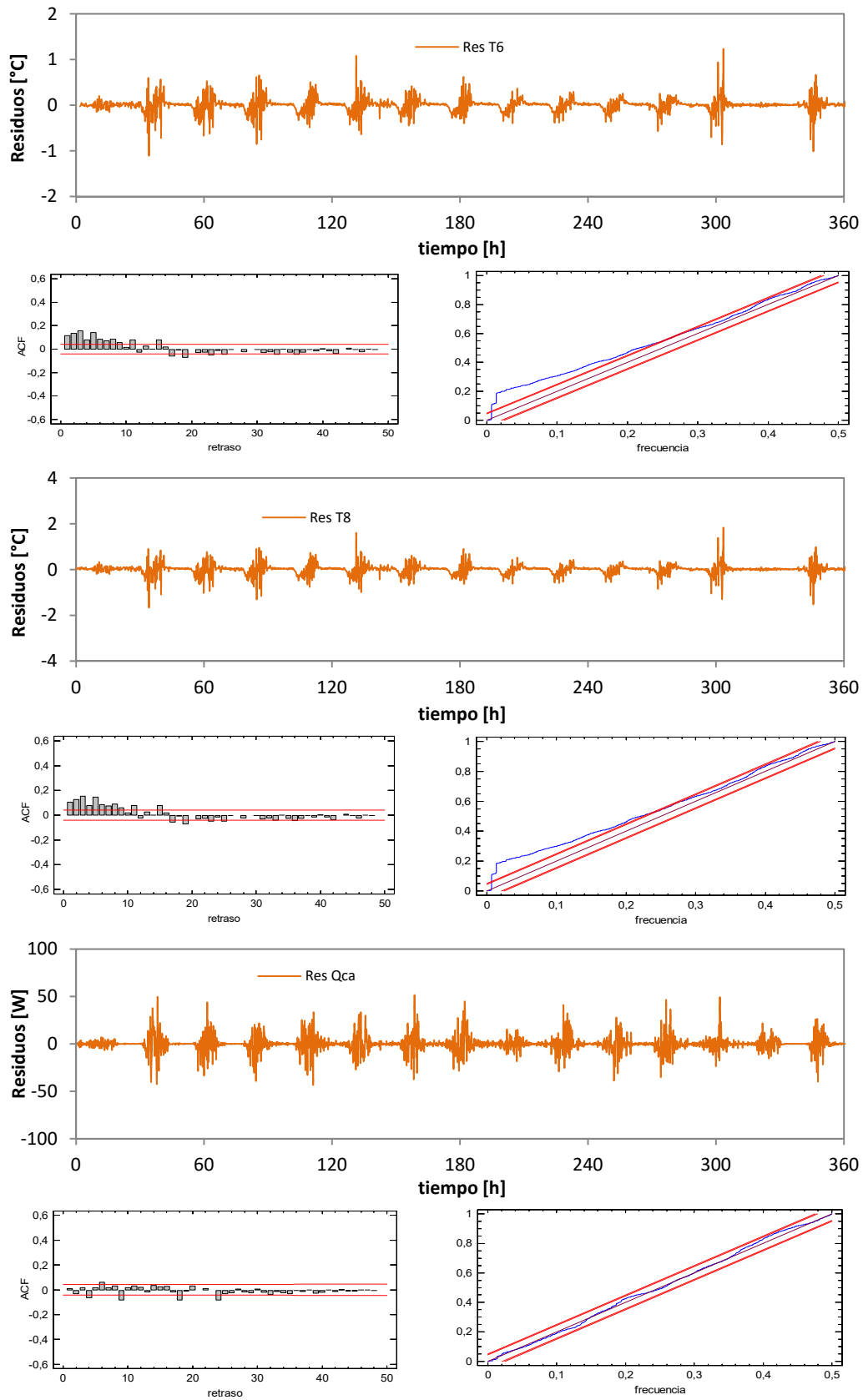


Figura D.33 – Ajuste del modelo completo de fachada ventilada ligera

En la Tabla D.19 se muestran los resultados finales de los parámetros térmicos de la cámara ventilada de la fachada ligera obtenida de los datos del modelo de parámetros concentrados resuelto mediante el proceso de identificación de parámetros.

	<i>parámetro</i>	<i>valor</i>	<i>unidades</i>	<i>u_i [%]</i>
<i>aislante</i>	R_{LR}	1,132	m^2K/W	3,1
	h_{c5}	$1,81+131,46 \cdot v_{ca}$	W/m^2K	13,5
<i>cámara</i>	h_{c6}	$3,92+108,54 \cdot v_{ca}$	W/m^2K	5,7
<i>aire</i>	$P_0(H_{rad56})$	1,077	-	14,4
	$A(Q_{ca})$	1,067	-	5,4
<i>placa</i>	R_{p-c}	0,059	m^2K/W	12,1
<i>cemento</i>	C_{p-c}	0,023	MJ/m^2K	22,3
	h_{ext}	24,52	W/m^2K	9,8
<i>exterior</i>	$A(G_v)$	0,821	-	8,7

Tabla D.19 – Resultados del modelo de parámetros concentrados de la cámara de aire de la fachada ventilada ligera



*Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos*





ANEXOS

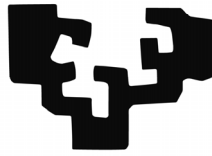
Caracterización Experimental del Comportamiento Energético de Fachadas Ventiladas

César Escudero Revilla
2016



Fotografía portada:
James Natchwey

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



*Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos*

Anexos

Caracterización Experimental del Comportamiento Energético de Fachadas Ventiladas

César Escudero Revilla
(Ingeniero Industrial)

Universidad del País Vasco (UPV/EHU), en cumplimiento con los requisitos para el grado de doctor dentro del programa de doctorado Ingeniería Térmica del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

Directores de Tesis:
Dr. José María Pedro Sala Lizarraga
Dr. Koldobika Martín Escudero

Vitoria-Gasteiz, 2016



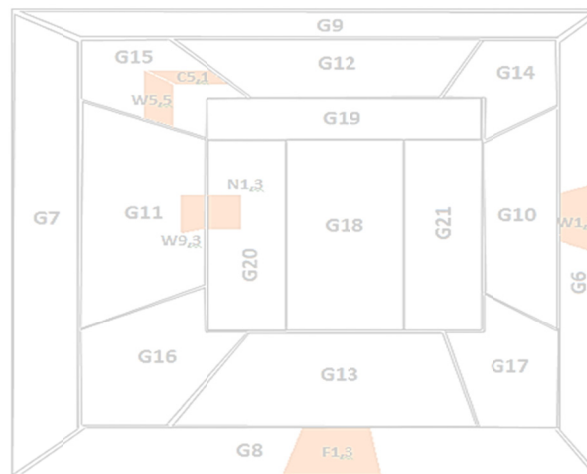
Índice



Anexo A.....	1
A.1 Rutinas de ensayo.....	3
A.2 Datos experimentales	5
A.2.1 Rutina ROLBS	5
A.2.2 Rutina PRBS.....	12
A.3 Modelos experimentales	18
A.3.1 Modelo de la celda	18
A.3.2 Modelo del muro de calibración.....	61
Anexo B.....	89
B.1 Datos experimentales.....	91
B.1.1 Primer componente	91
B.1.2 Segundo componente.....	96
B.2 Modelos matemáticos.....	101
B.2.2 Modelos del primer componente.....	101
B.2.3 Modelos del segundo componente.....	116
Anexo C.....	127
C.1 Muro base	129
C.1.1 Instrumentación de la muestra	129
C.1.2 Datos experimentales complementarios.....	131
C.2 Muro base con aislamiento	137
C.2.1 Instrumentación de la muestra	137
C.2.2 Datos experimentales complementarios.....	139
C.3 Fachada ventilada ligera	145
C.3.1 Instrumentación de la muestra	145
C.3.2 Datos experimentales ensayo de contraste	148
C.4 Fachada ventilada pesada.....	154
C.4.1 Instrumentación de la muestra	154
C.4.2 Datos experimentales ensayo de contraste	157
C.5 Fachada ventilada forzada	163
C.5.1 Instrumentación de la muestra	163
C.5.2 Datos experimentales ensayos de contraste	166
C.6 Ensayo de infiltraciones	171
Anexo D	175
D.1 Modelo de muro base sin aislamiento	177
D.1.1 Modelo unidimensional	177
D.1.2 Modelo completo	180
D.2 Modelo de muro base con aislamiento.....	184
D.2.1 Modelo unidimensional	184
D.2.2 Modelo completo	187
D.3 Modelo de fachada ventilada.....	192
D.3.1 Modelo CFD	192
D.3.2 Modelo de parámetros concentrados.....	211

Anexo A

Ensayo de Calibración



A.1 Rutinas de ensayo

Como se indica en el apartado 2.1.1 del Capítulo 2 para la realización de los ensayos se emplea dos tipos de rutinas denominadas PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) y ROLBS (Randomly Ordered Logarithmically distributed Binary Sequence). La forma de ambas secuencias se muestra en la Figura A.1.

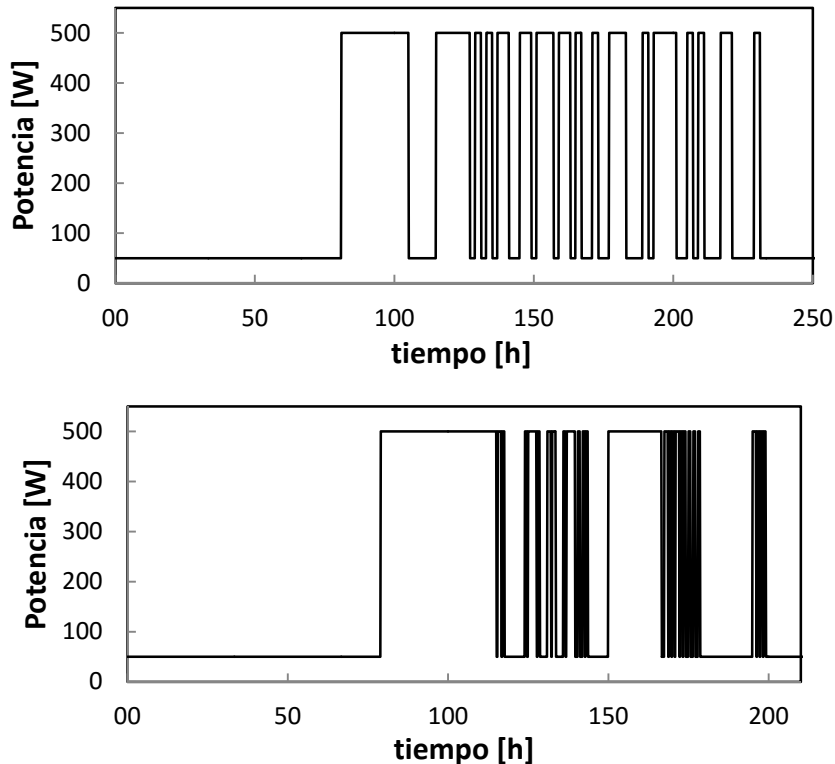


Figura A.1 – Rutina PRBS, gráfica superior, y rutina ROLBS, gráfica inferior

En la Tabla A.1 se recogen el patrón de ambas secuencias. En el caso de la rutina PRBS el intervalo mínimo de trabajo es de $\Delta t = 2$ [h] y la duración del ciclo de calefactor es de $T = 152$ [h], con un periodo previo de estabilización libre, sin calentamiento, de $T_{inicial} = 72$ [h]. Esta rutina de ensayo permite analizar el comportamiento a frecuencias medias y por tanto, adecuado para muestras con una inercia representativa. En el caso de la rutina ROLBS, el intervalo mínimo es de $\Delta t = 0,5$ [h], y la duración del ciclo de calentamiento es de $T = 120$ [h]. Ambas rutinas son aplicables a cualquier tipo de muestra bajo ensayo, aunque la rutina PRBS es de mayor interés en el estudio de muestras con inercia representativa, y la rutina ROLBS está más orientada a muestras ligeras. Lo idóneo se realizar ambas rutinas en todos los ensayos, como ha sido el caso del presente trabajo de tesis, pero si no se dispone del tiempo necesario la rutina base de ensayo sería la rutina ROLBS. Estas rutinas han sido desarrolladas por la red PASLINK, y están recogidas dentro de la documentación y manuales asociados, pero en algunos casos es complicado acceder a dicha información. En este documento simplemente se quiere hacer más accesible dichos datos para otros investigadores.

PRBS		ROLBS		ROLBS	
Δt [h]	calefactor	Δt [h]	calefactor	Δt [h]	Calefactor
72	0	72	0	1	0
24	1	36	1	0,5	1
10	0	0,5	0	1	0
12	1	1	1	0,5	1
2	0	0,5	0	1	0
2	1	6,5	1	0,5	1
2	0	0,5	0	16,5	0
2	1	0,5	1	1	1
2	0	0,5	0	0,5	0
4	1	2,5	1	0,5	1
4	0	0,5	0	0,5	0
4	1	0,5	1	0,5	1
2	0	2,5	0	0,5	0
6	1	1	1	0,5	1
2	0	0,5	0		
4	1	1	1		
2	0	2,5	0		
2	1	0,5	1		
4	0	0,5	0		
2	1	2,5	1		
4	0	1	0		
6	1	0,5	1		
6	0	1	0		
2	1	0,5	1		
2	0	0,5	0		
8	1	0,5	1		
4	0	6,5	0		
2	1	16,5	1		
2	0	0,5	0		
2	1	1	1		
6	0	0,5	0		
4	1	0,5	1		
8	0	0,5	0		
2	1	0,5	1		
		0,5	0		
		1	1		
		0,5	0		
		0,5	1		
		0,5	0		
		0,5	1		

Tabla A.1 – Secuencia de las rutinas PRBS y ROLBS

A.2 Datos experimentales

El proceso de calibración se realiza aplicando las tres rutinas de ensayo usuales de trabajo, la rutina *PULSO*, *ROLBS* y *PRBS*. Este procedimiento de trabajo permite obtener unos factores de calibración más fiables y representativos del comportamiento global de la celda durante los ensayos, principalmente en la medida del flujo de calor que intercambia la envolvente de la sala de ensayos. En la memoria se expone un análisis detallado de los datos experimentales tomando como referencia la rutina *PULSO*, a continuación se muestran los datos del resto de ensayos que posteriormente se aplican al estudio de la medida de los efectos de borde y al proceso de identificación de parámetros de los modelos de la celda.

Además, el proceso de calibración corresponde con los primeros pasos en el uso de la celda *PASLINK*, y por tanto, es una fase fundamental para comenzar a conocer del comportamiento del equipo, junto con la repercusión del proceso de calibración en la fiabilidad de los resultados de ensayos posteriores durante el periodo de uso. Pero, sobre todo, es la primera toma de contacto fundamental con la metodología de trabajo. En esta primera fase no hay que escatimar en repetir las rutinas, en analizar con detalle todos los datos disponibles, comprender que sucede en cada uno de los ámbitos, como por ejemplo, medida del flujo de calor, perfiles de temperaturas, etc..., ya que es la fase en la que se deben ajustar correctamente todos los parámetros. Y aunque el equipo está diseñado con unos estándares de trazabilidad muy buenos, cada celda de ensayos es particular, y los técnicos que la empleen deben conocer su equipo con detalle para poder obtener resultados precisos y representativos.

A.2.1 Rutina *ROLBS*

Para comenzar el proceso de calibración lo más idóneo es aplicar primero la rutina *PULSO* y posteriormente las dos rutinas con régimen aleatorio, el orden de estas puede ser cualquiera. En este caso, se comienza por la rutina *ROLBS*, y posteriormente se aplica la rutina *PRBS*. Este orden tiene como objetivo la detección de posibles errores de medida de las *tilas* o de las sondas de temperatura. La rutina *PULSO*, por su sencillez permite detectar malfuncionamientos de los sensores de medida, algún grupo específico de *tilas*, o algún sensor de las *multitilas*, o verificar la homogeneidad de las temperaturas del ambiente para el ajuste de la potencia de ventilación en la sala de ensayos. Por su complejidad, primero se comienza el análisis por la medida del flujo de calor y posteriormente se estudian las temperaturas.

A.2.1.1 Flujo de la envolvente

En la Figura A.2 se muestran la potencia eléctrica inyectada en el ventilador y el calefactor de la sala de ensayos junto al flujo total que atraviesa la envolvente. Como ya se comenta en la memoria, el rizado de la señal eléctrica es elevado debido a la red de abastecimiento. Este rizado, en principio no presenta mayor relevancia, pero posteriormente se emplea una *SAI*, *Sistema de Alimentación Ininterrumpida*, con un filtro que permite obtener una alimentación eléctrica de mayor calidad, lo que reduce el ruido en las medidas del conjunto de la instrumentación del ensayo, mejorando así, la calidad de la información que posteriormente se emplea en los procesos de identificación de parámetros, muy sensibles a dicho ruido.

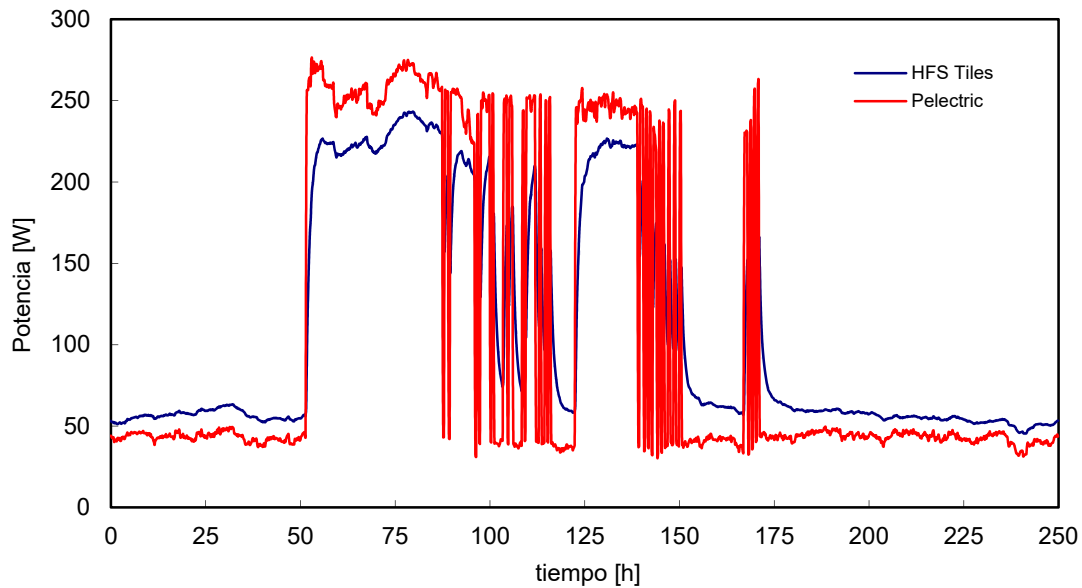


Figura A.2 – Potencia eléctrica de calentamiento y medida del flujo de las HFS Tiles para las rutinas ROLBS

Aunque la señal del flujo total de la envolvente sea correcta es necesario verificar que cada grupo se comporta adecuadamente, ya que la suma total puede emascarar algún comportamiento erróneo de algún grupo en particular. El primer paso es verificar los flujos medios por unidad de superficie para cada uno de dichos grupos que recubren las paredes interiores de la envolvente de la sala de ensayos, ver Figura A.3. Se debe cumplir que los flujos mínimos se obtienen en los grupos centrales de cada superficie, y dichos valores deben estar próximos entre sí. Los grupos de borde correspondientes a las esquinas longitudinales deben presentar un flujo superior a cualquiera de los flujos centrales que les rodean, y deben los superiores e inferiores deben parecerse entre sí. Los flujos de la cara norte deben ser homogéneos, y los flujos de los grupos de borde que rodean la muestra deben presentar los valores más elevados y con mayor divergencia entre sí.

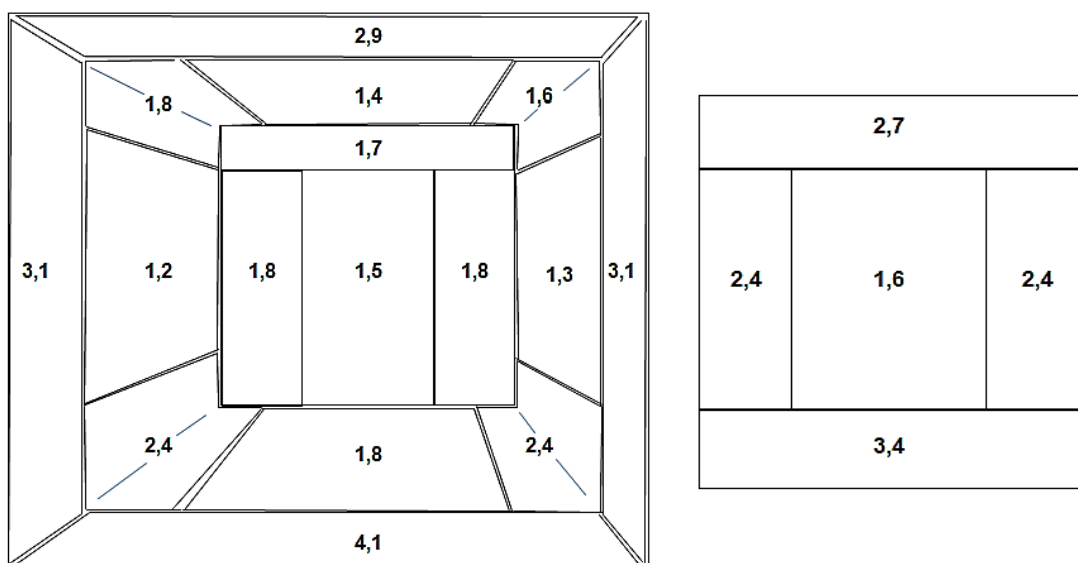


Figura A.3 – Flujos promedio por unidad de superficie en la cara norte, y envolvente de la sala de ensayos, izquierda, y en el muro de calibración, derecha, para la rutina ROLBS

El siguiente paso es analizar la evolución a lo largo del tiempo del flujo, comparando entre sí los grupos situados en zonas equicalentes, aplicando el chequeo de resultados esperados que se indica en la memoria. Los datos experimentales se muestran en la Figura A.4 a la Figura A.14. Como se puede observar, los resultados son similares en el comportamiento a los obtenidos en el estudio de la rutina *PULSO*, desarrollado con más detalle en la memoria.

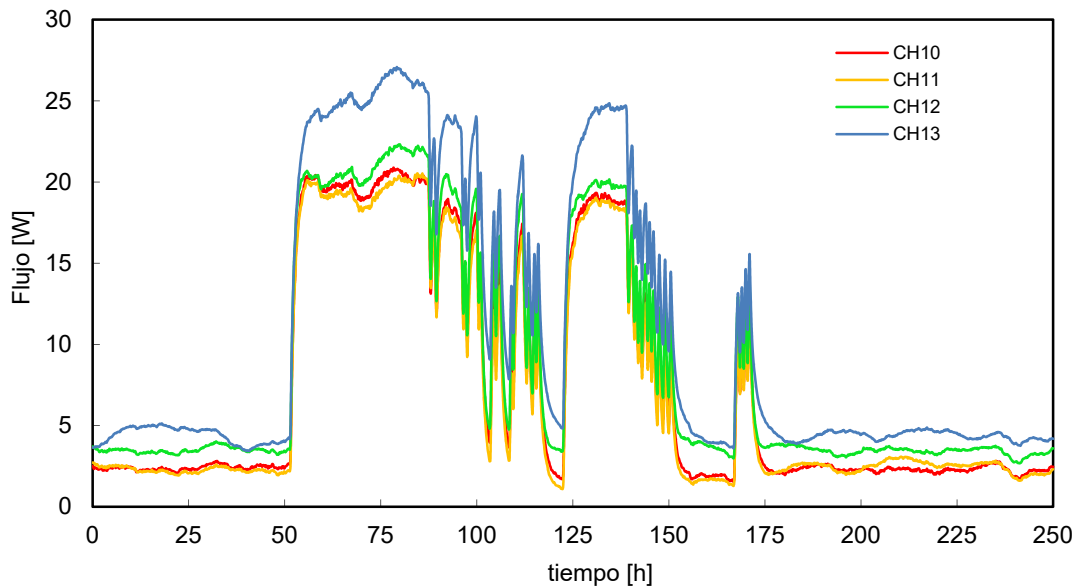


Figura A.4 – Flujo medido por los grupos centrales de la envolvente de la sala de ensayo

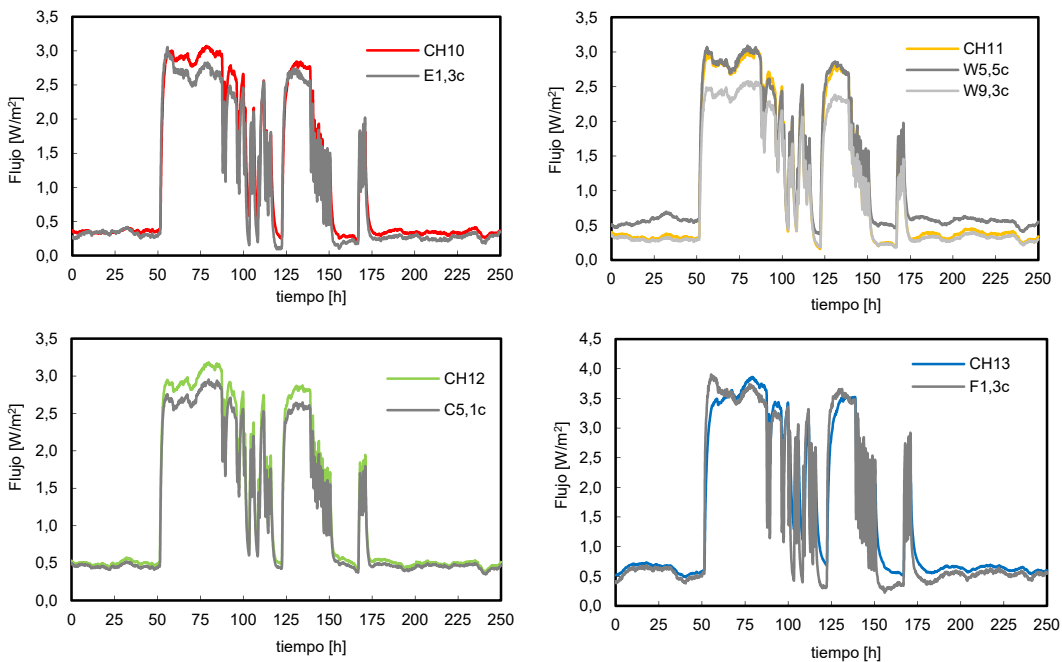


Figura A.5 – Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie de los grupos centrales equivalentes

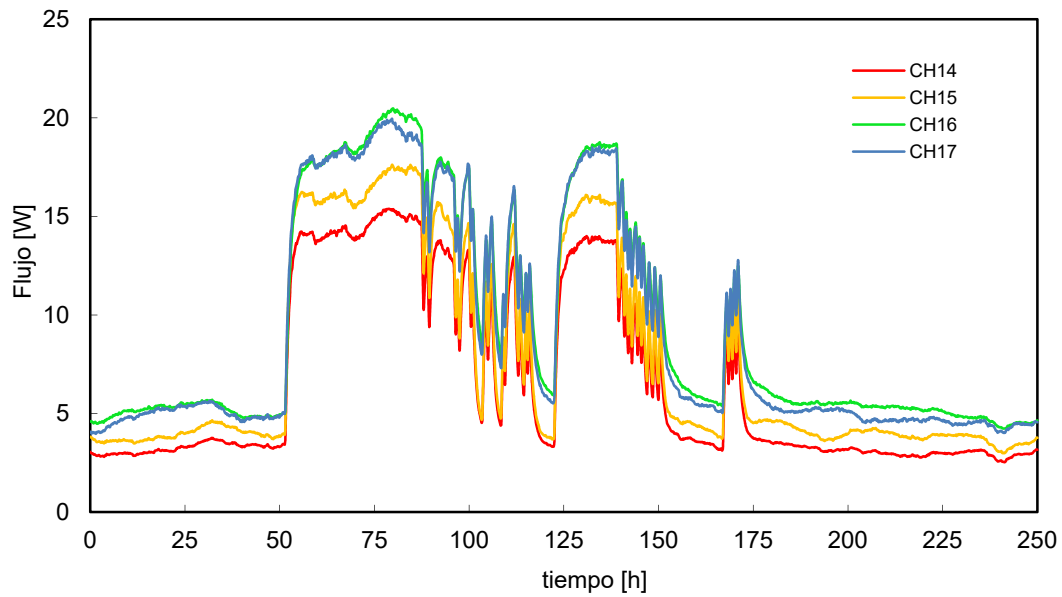


Figura A.6 – Flujo medido por los grupos de borde longitudinales, tipología 1, de la envolvente de la sala de ensayo

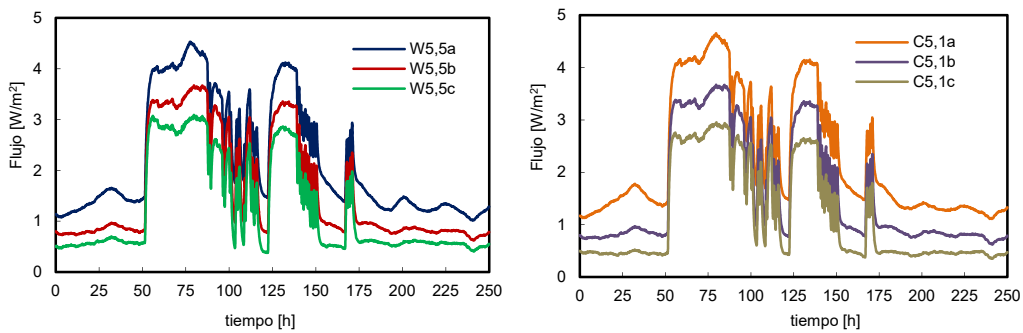


Figura A.7 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde longitudinales, tipología 1

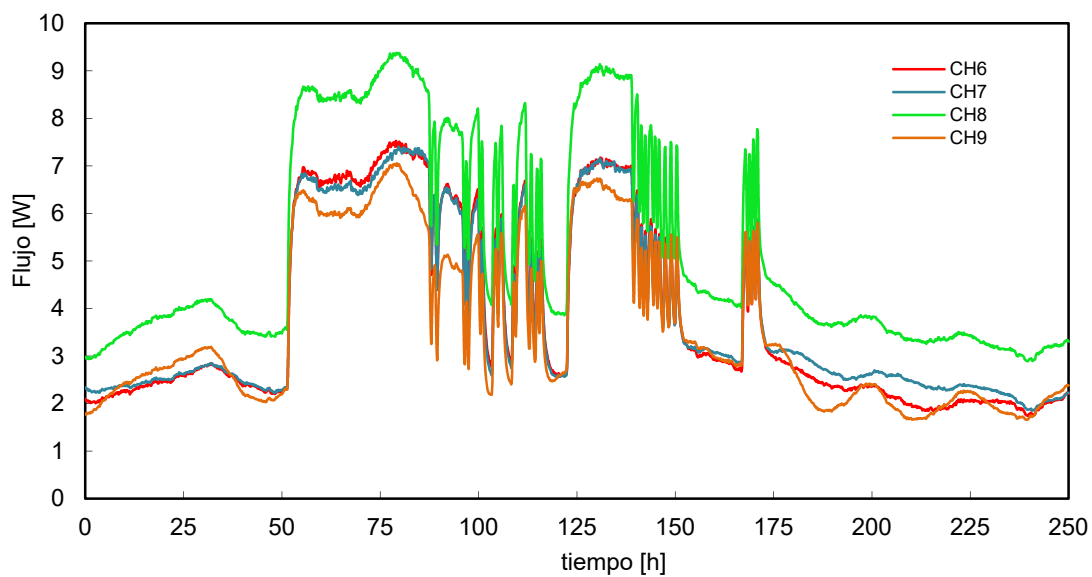


Figura A.8 – Flujo medido por los grupos de borde sur, tipología 2 y 3, de la envolvente de la sala de ensayo

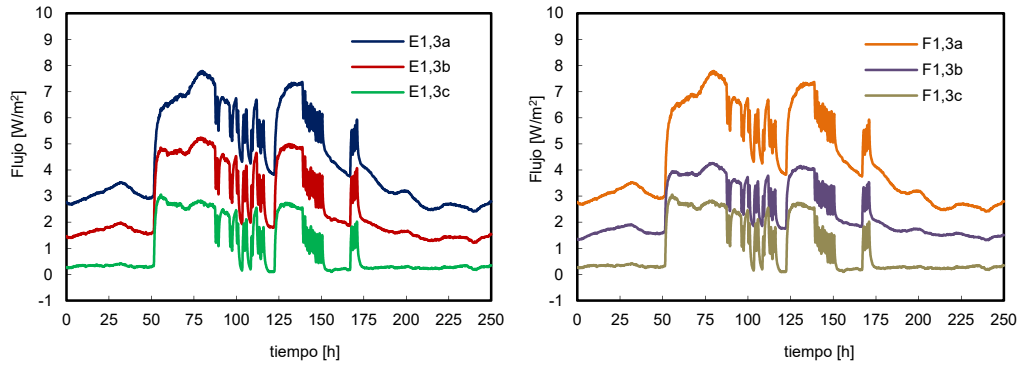


Figura A.9 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde sur, *tipología 2 y 3*

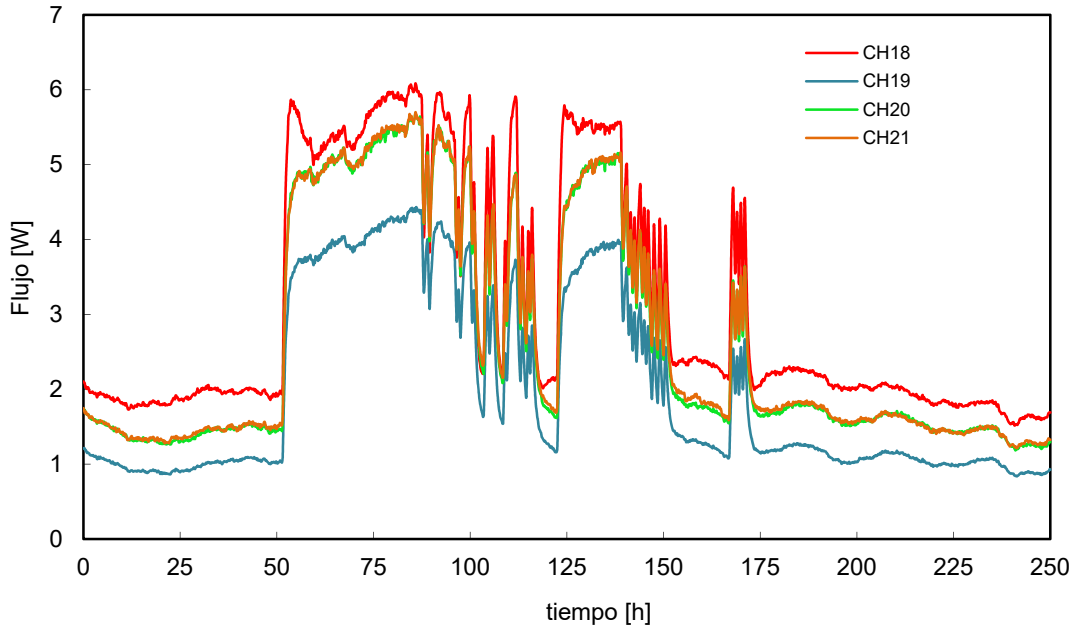


Figura A.10 – Flujo medido por los grupos de borde norte, *tipología 4*, de la envolvente de la sala de ensayo

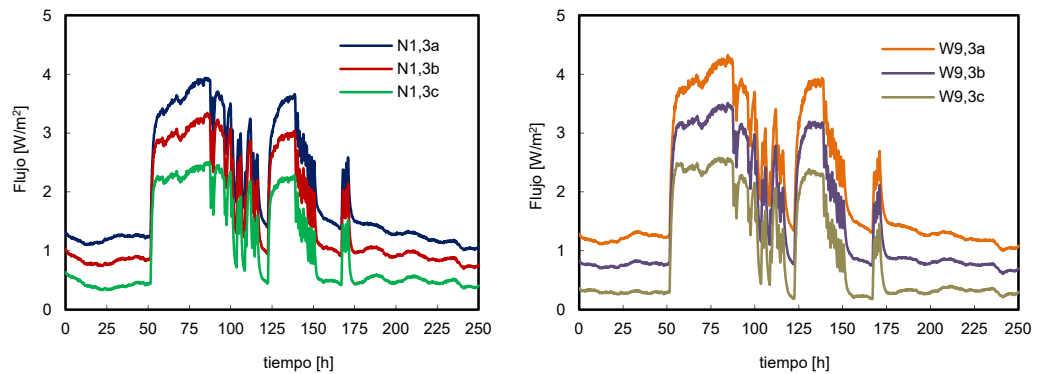


Figura A.11 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde norte, *tipología 4*

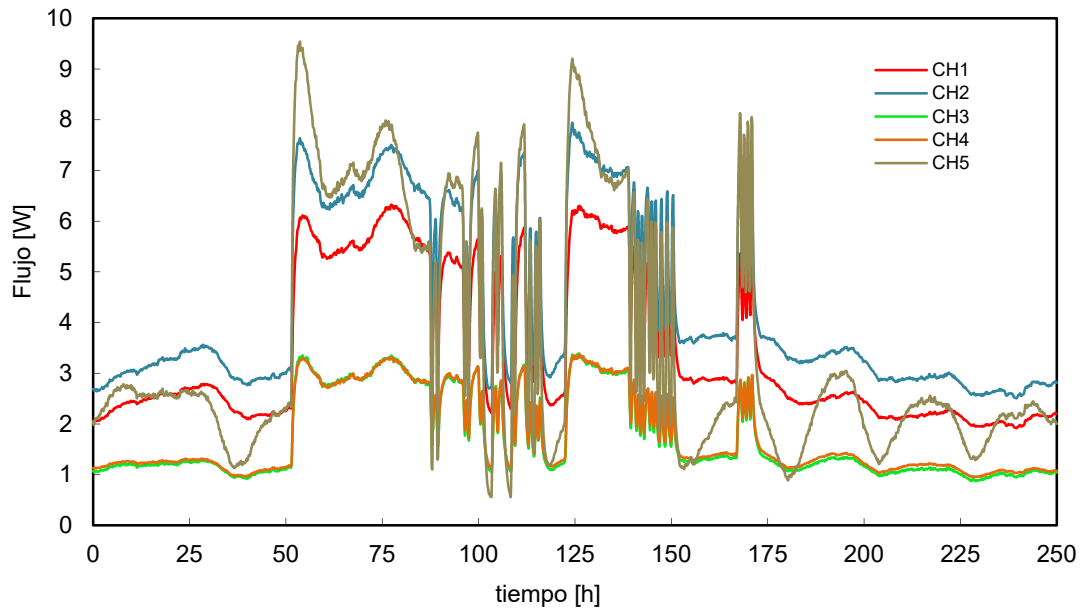


Figura A.12– Flujo medido por los grupos del muro de calibración

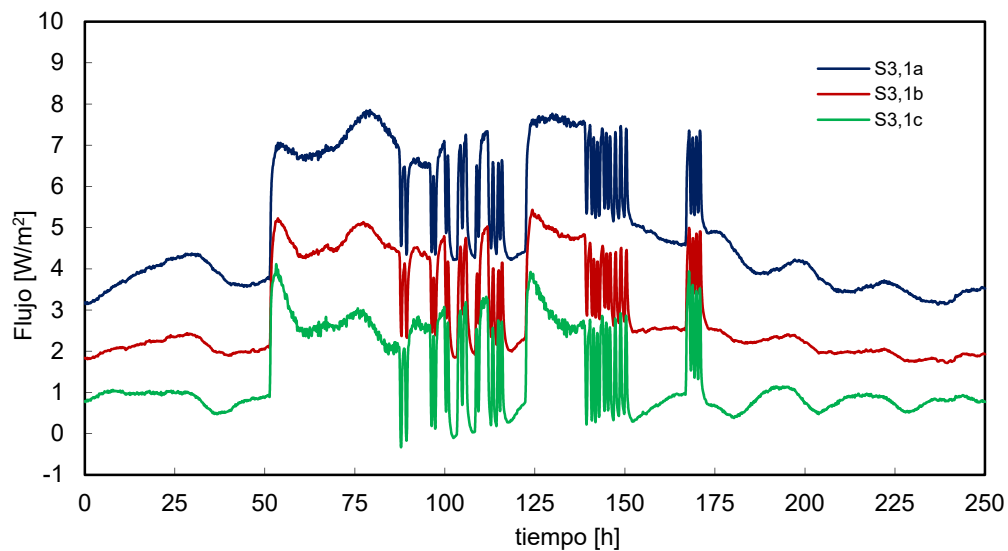


Figura A.13– Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie del grupo central del muro de calibración

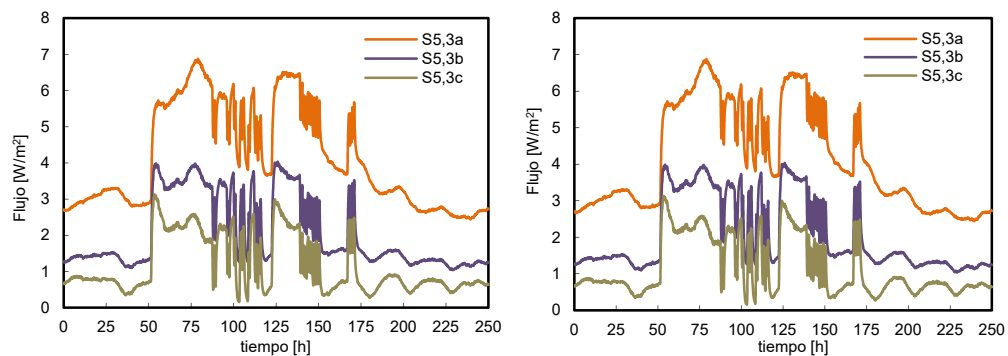


Figura A.14– Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde en el muro de calibración

A.2.1.2 Temperaturas

El análisis de las temperaturas es fundamental para asegurar unas condiciones idóneas para el precoso de identificación de parámetros. Por un lado, se debe asegurar un salto de temperaturas suficiente entre el ambiente interior de la sala de ensayos y el exterior como para conseguir un flujo intercambiado con una incertidumbre reducida. Por otro lado, hay que asegur unas condiciones homogéneas de las temperaturas interiores del aire sala de ensayos de cara a simplificar los modelos de trabajo. El aseguramiento de estas condiciones se muestra desde la Figuras A.15 a la Figura A.17, para el periodo de ensayo en el que se aplica la rutina *ROLBS*.

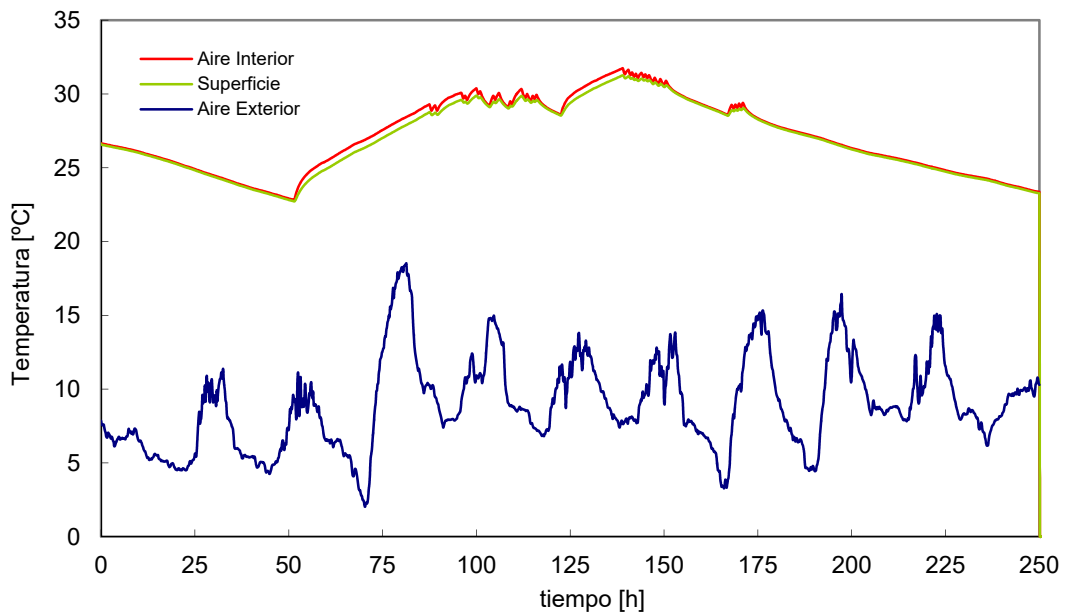


Figura A.15– Temperaturas de aire y superficie de la sala de ensayos y temperatura exterior ventilada para la rutina *ROLBS*

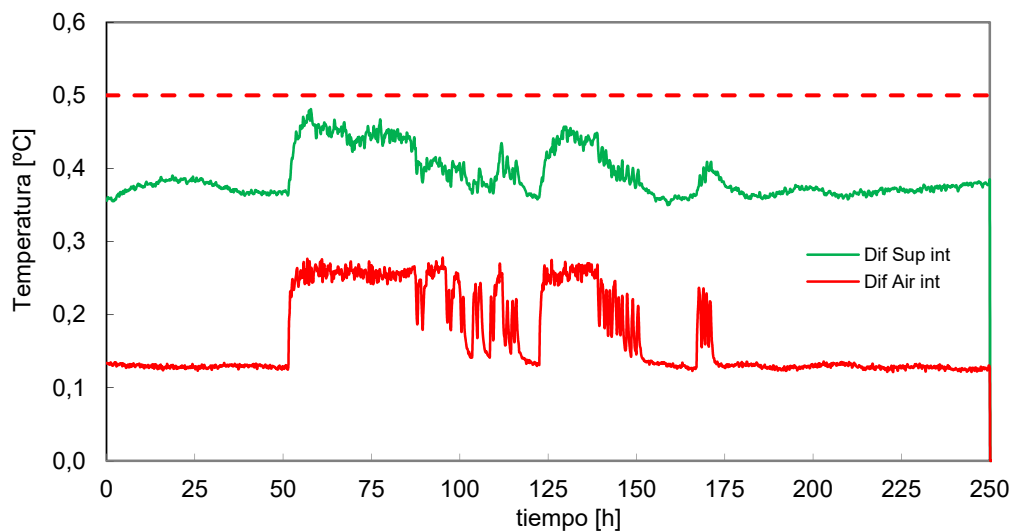


Figura A.16 – Diferencias máximas para las temperaturas de aire y superficie de la sala de ensayos durante la rutina *ROLBS*

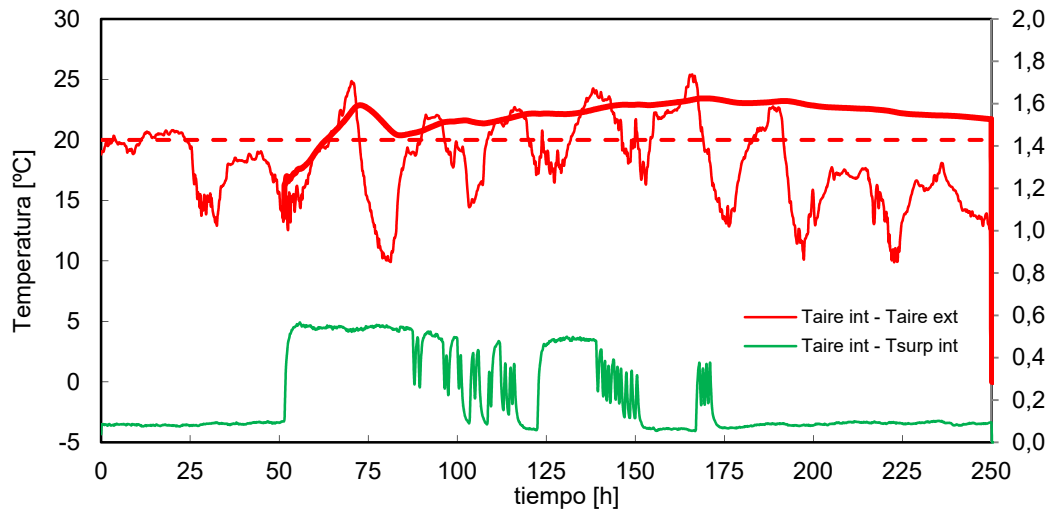


Figura A.17- Salto de temperatura entre el ambiente interior y el exterior, eje izquierdo, y entre ambiente y superficie, eje derecho, durante la rutina ROLBS

A.2.2 Rutina PRBS

De igual forma a análisis realizado anteriormente se evalúa el comportamiento para la rutina PRBS, que permite estudiar la respuesta de la celda para frecuencias medias, de forma que se barre todo el espectro de trabajo.

A.2.2.1 Flujo de la envolvente

En la Figura A.18 se muestran la potencia eléctrica y el flujo de calor en la sala de ensayos para la rutina PRBS, que corresponden con la tercera rutina de ensayo empleada para el proceso de calibración.

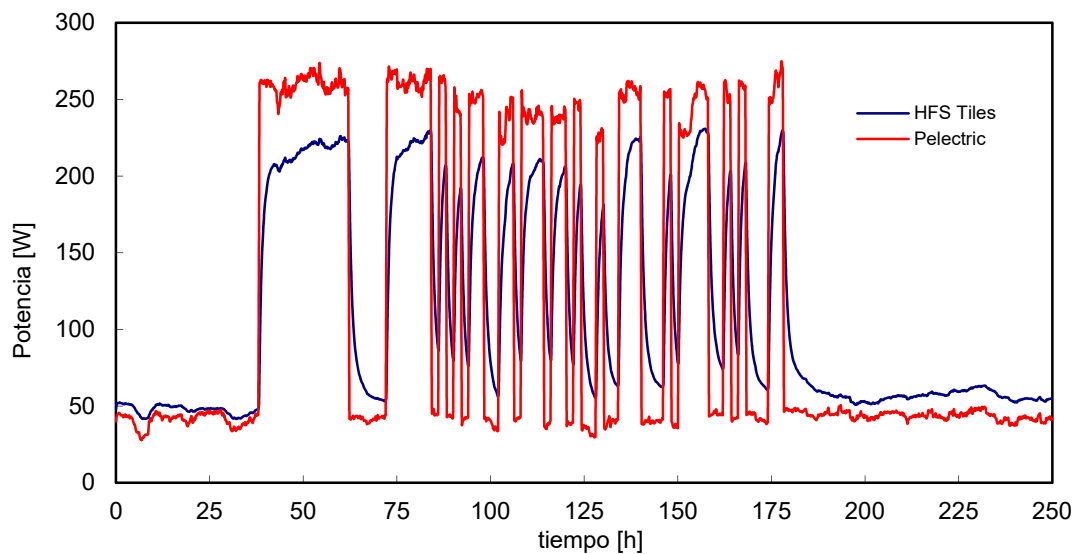


Figura A.18 - Potencia eléctrica de calentamiento y medida del flujo de las HFS Tiles para las rutinas PRBS

En la Figura A.20 se muestran los flujos medios por unidad de superficie que se dan durante este ensayo. Los valores don coherentes con los obtenidos en los anteriores ensayos y con las condiciones de la celda EGUZKI.

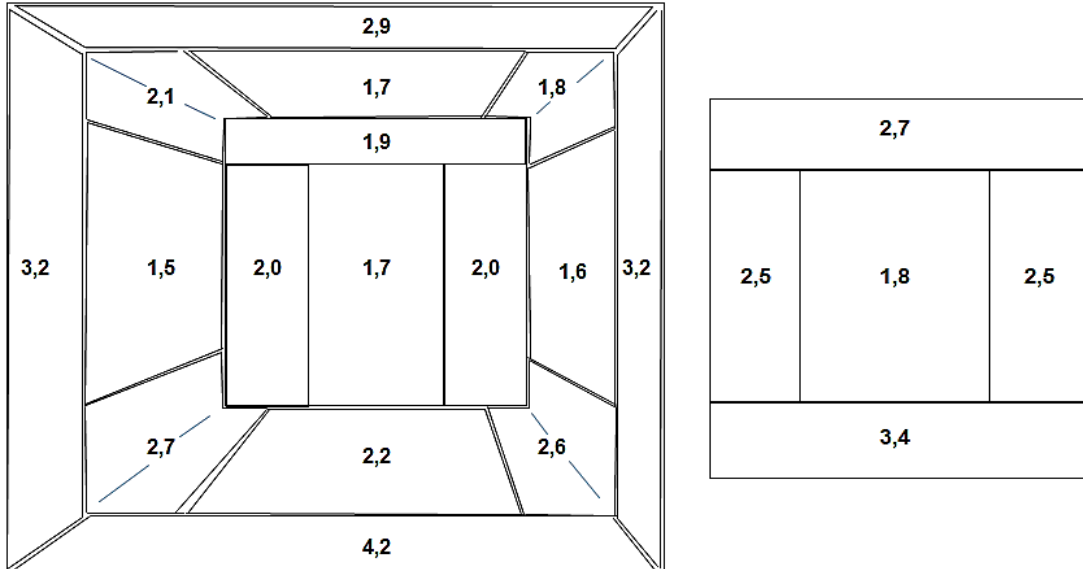


Figura A.19 – Flujos promedio por unidad de superficie en la cara norte, y envoltorio de la sala de ensayos, izquierda, y en el muro de calibración, derecha, para la rutina PRBS

Este mismo comportamiento se obtiene en el análisis de la evolución temporal de cada grupo de *tiles*, así como la evolución de los flujos de borde en las zonas de esquina como se muestra desde la Figura A.20 a la Figura A.30.

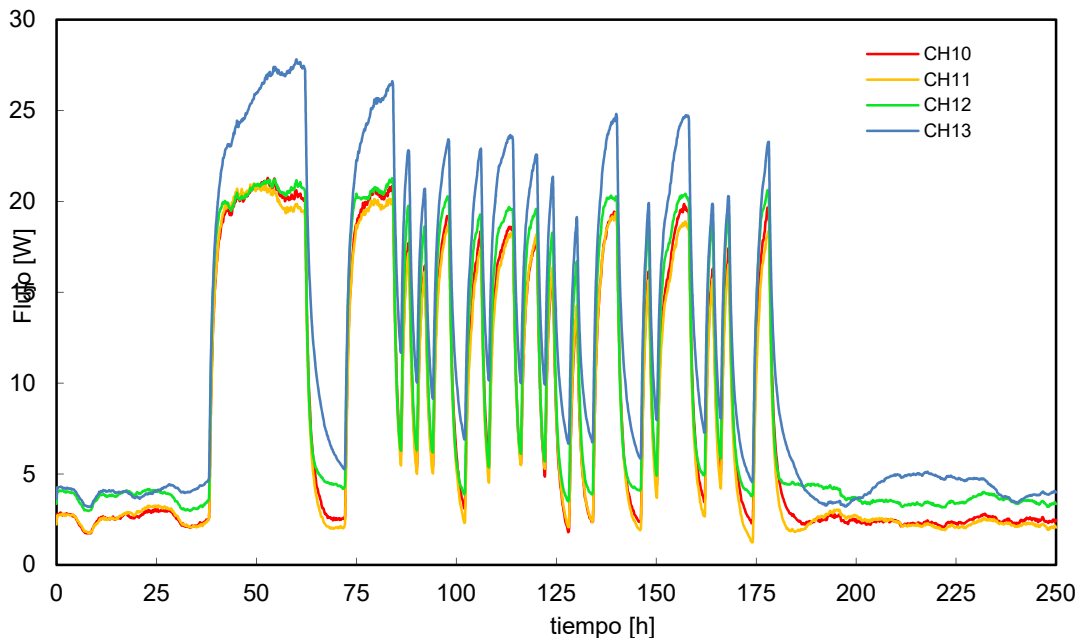


Figura A.20 – Flujo medido por los grupos centrales de la envoltorio de la sala de ensayo

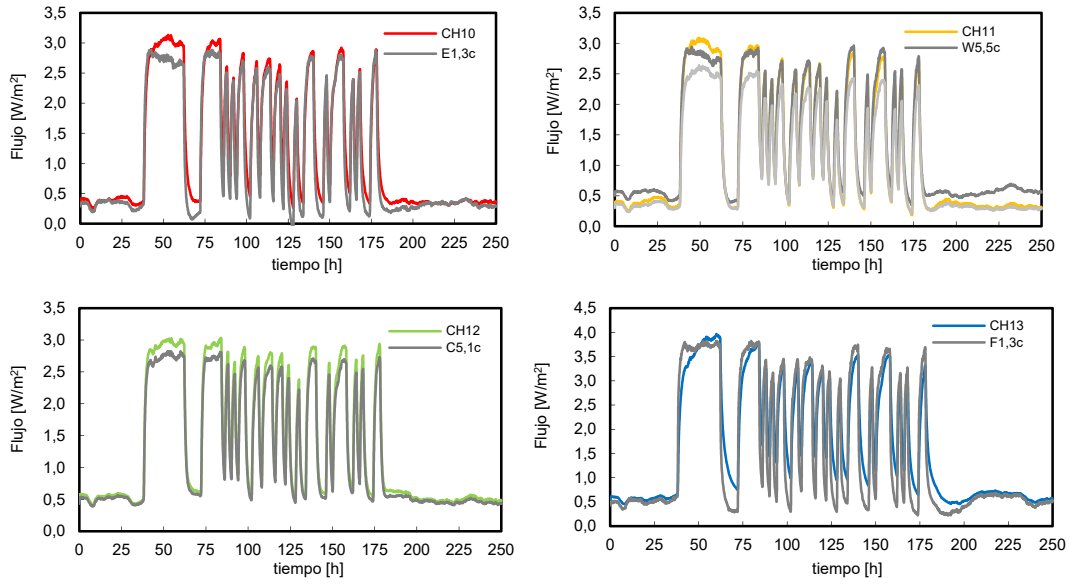


Figura A.21 – Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie de los grupos centrales equivalentes

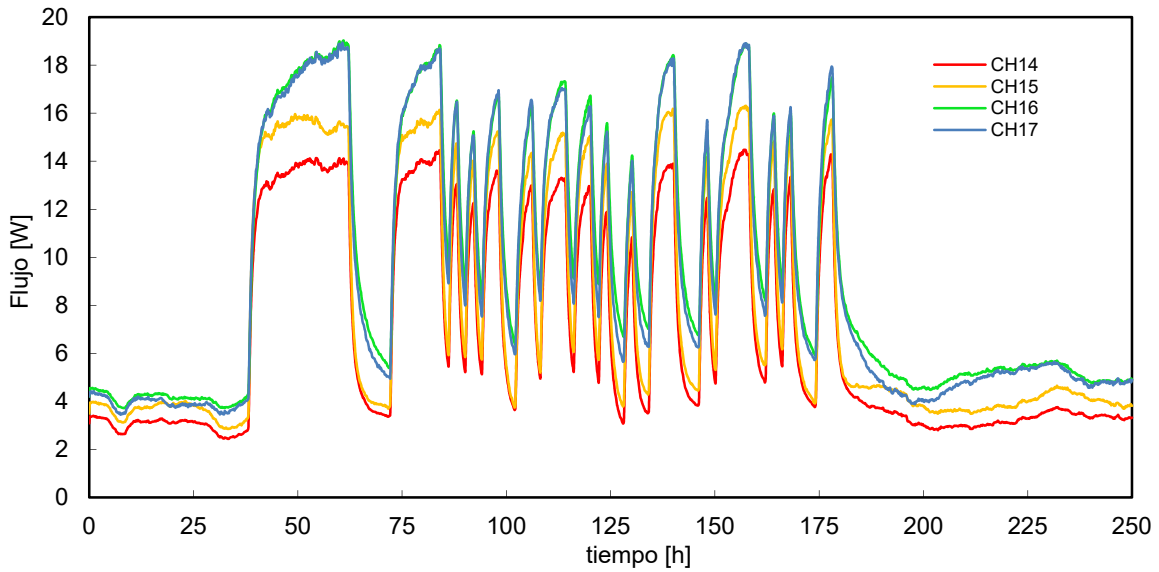


Figura A.22 – Flujo medido por los grupos de borde longitudinales, tipología 1, de la envolvente de la sala de ensayo

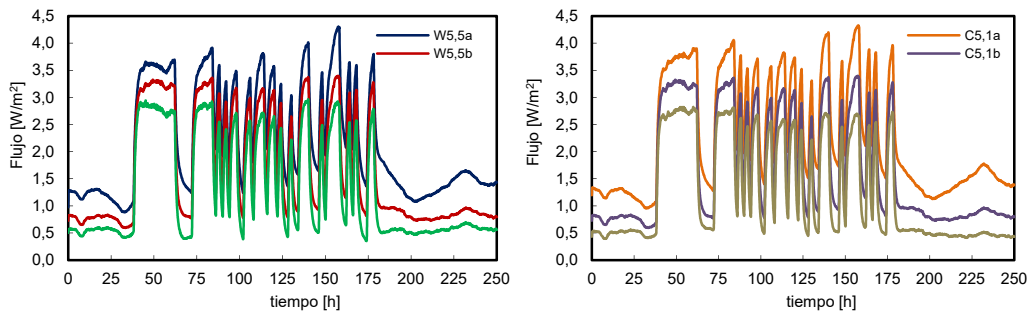


Figura A.23 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde longitudinales, tipología 1

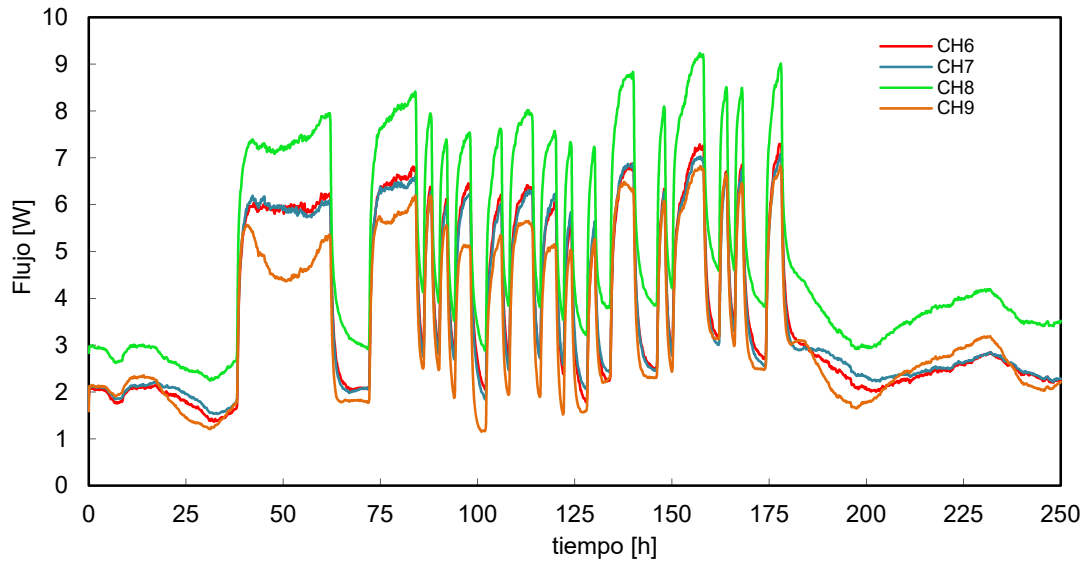


Figura A.24 – Flujo medido por los grupos de borde sur, *tipología 2 y 3*, de la envoltura de la sala de ensayo

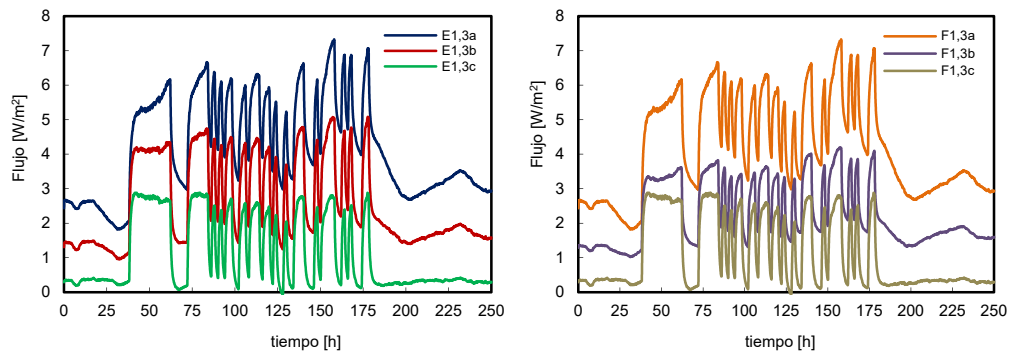


Figura A.25 – Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde sur, *tipología 2 y 3*

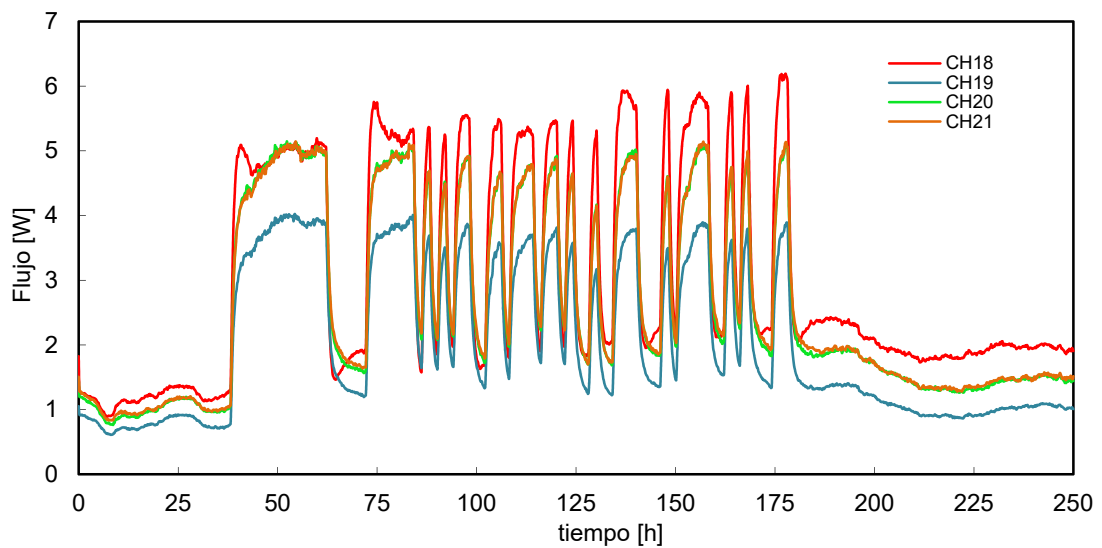


Figura A.26 – Flujo medido por los grupos de borde norte, *tipología 4*, de la envoltura de la sala de ensayo

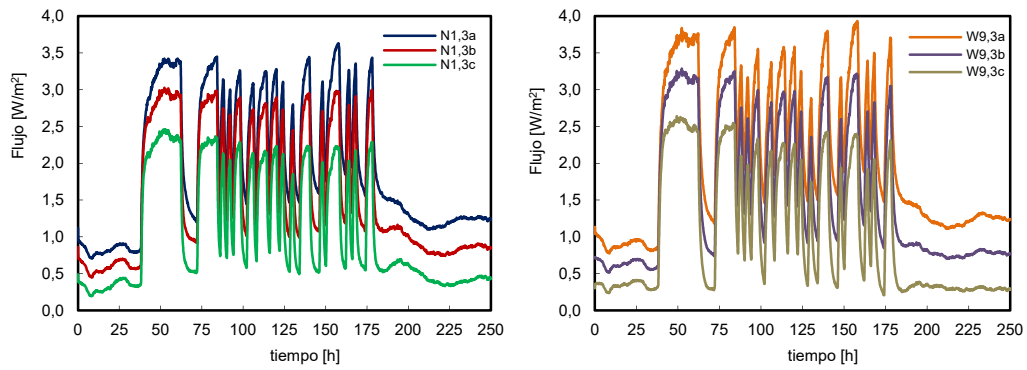


Figura A.27- Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde norte, tipología 4

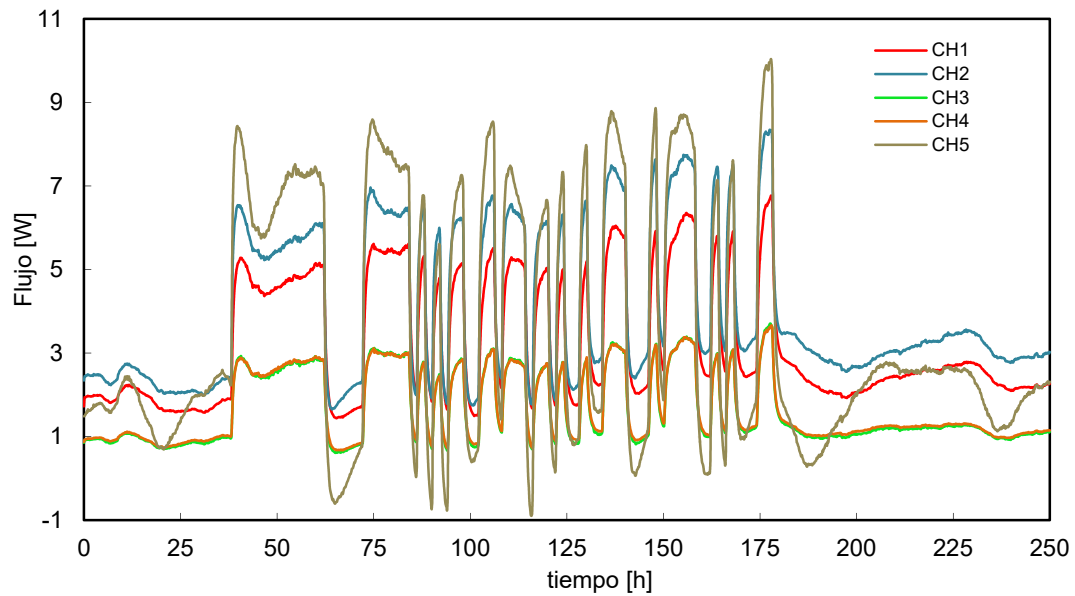


Figura A.28- Flujo medido por los grupos del muro de calibración

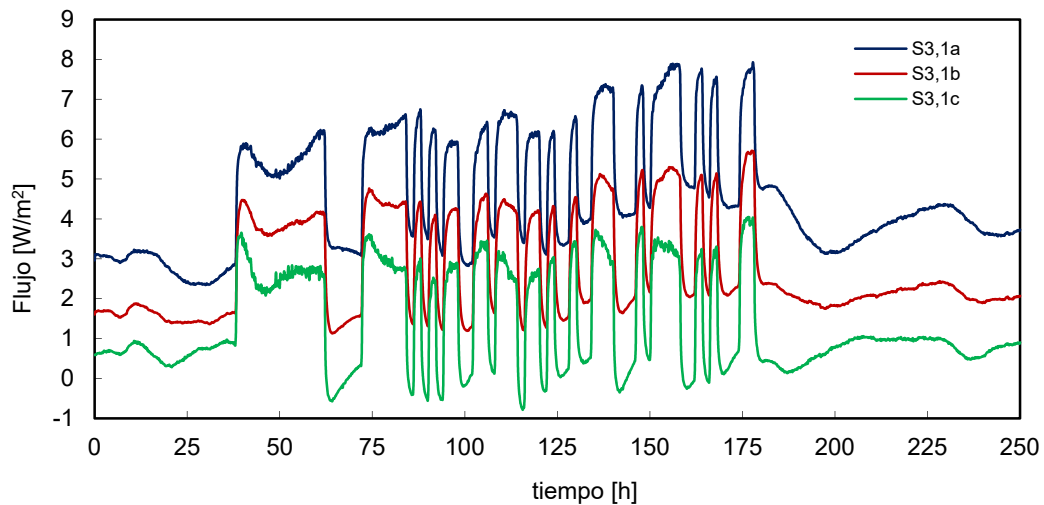


Figura A.29- Señal de los sensores situados en la posición C de las *multitiles* y flujo por unidad de superficie del grupo central del muro de calibración

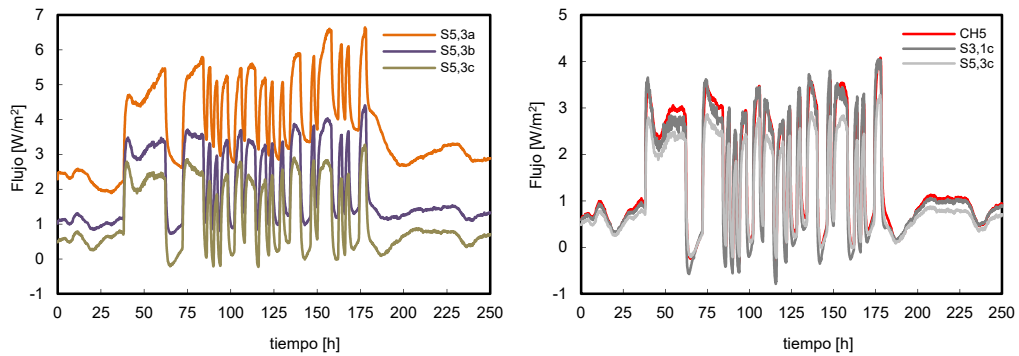


Figura A.30– Flujo medido por los tres sensores de las *multitiles* empleadas para la caracterización de los efectos de borde en el muro de calibración

A.2.2.2 Temperaturas

Como se puede ver en las gráficas que van de la Figura A.31 a la Figura A.33, durante este periodo de ensayo se cumplen las condiciones de homogeneidad de temperaturas en el interior de la sala de ensayos y el salto de temperaturas entre ambientes.

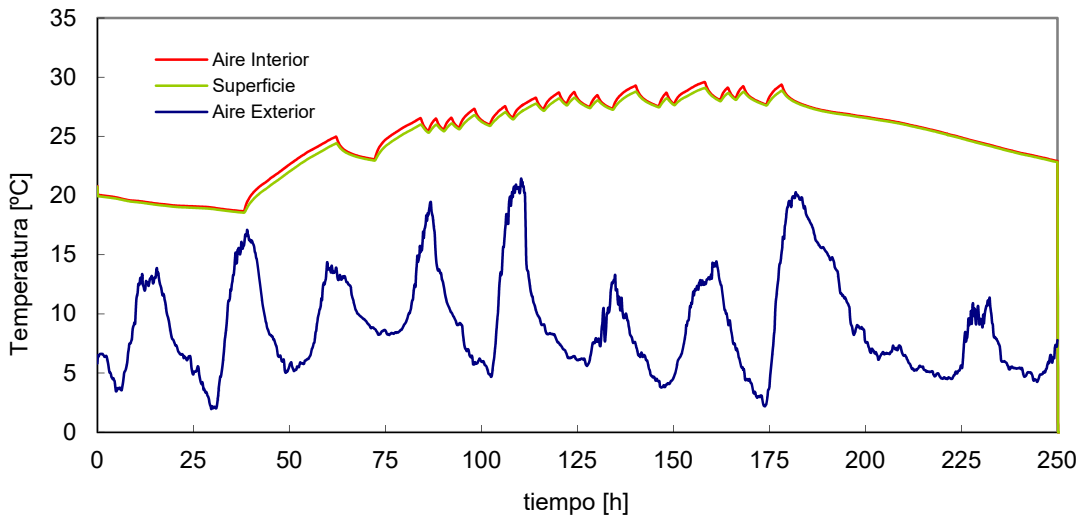


Figura A.31– Temperaturas aire y superficie de sala de ensayos y temperatura exterior ventilada para rutina PRBS

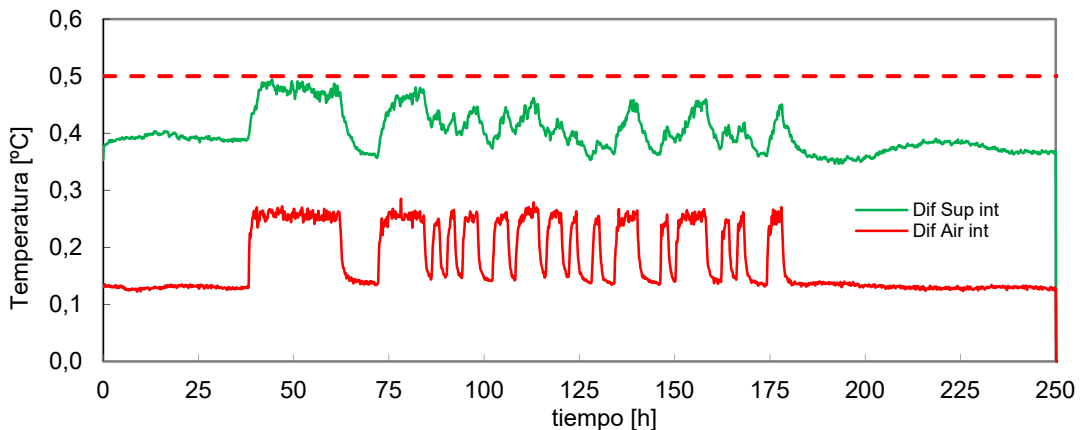


Figura A.32 – Diferencias máximas temperaturas aire y superficie de la sala de ensayos durante la rutina PRBS

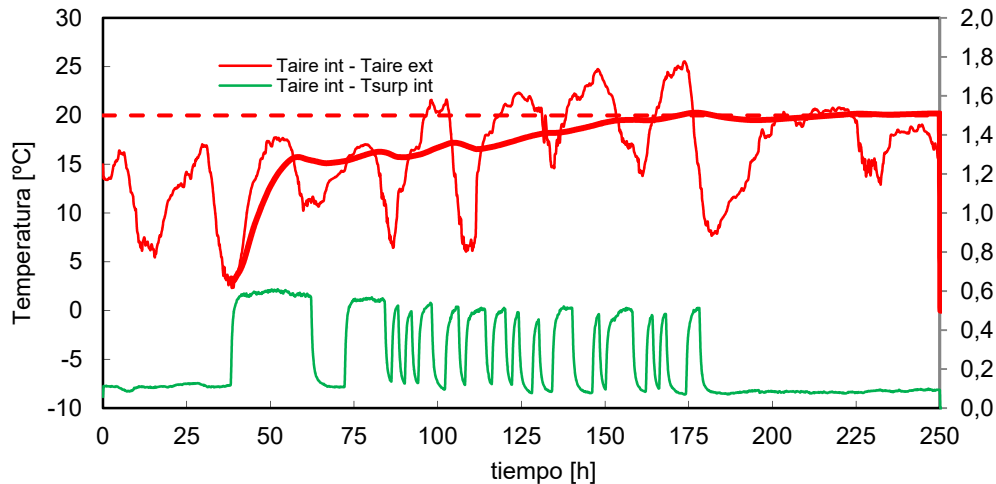


Figura A.33- Salto de temperatura entre el ambiente interior y el exterior, eje izquierdo, y entre ambiente y superficie, eje derecho, durante la rutina PRBS

A.3 Modelos experimentales

Una vez revisada la calidad de los datos se puede pasar a la fase de modelado. No tiene ningún sentido comenzar con el proceso de identificación de parámetros sin antes conocer el comportamiento de la celda y que los datos que se emplean como función objetivo corresponden con los valores que se introducen en el modelo. Es decir, si no se obtiene una homogeneidad adecuada de la temperatura de aire interior es complicado poder conseguir un modelo con residuos que presenten un ajuste adecuado con un único nodo que represente dicho aire interior, por ejemplo. Por tanto, la fase de revisión de los datos experimentales es fundamental para dirigir la selección del modelo adecuado. Proceso que se define a continuación.

A.3.1 Modelo de la celda

Como ya se indica en la memoria, el objetivo de diseño de la celda *PASLINK* es disponer de un equipo de ensayo que se pueda modelar mediante el sistema de parámetros más simple posible. Esto permite disponer mayor potencialidad de análisis en la definición de las muestras bajo ensayo. Para la obtención del modelo representativo de la celda *EGUZKI*, se han analizado los modelos recogidos en la Figura A.34. La elección del modelo definitivo se realiza en base a los resultados obtenidos en los parámetros de la celda, como son la transmitancia y la capacidad térmica, así como mediante el análisis de ajuste a patrón de ruido blanco de los residuos correspondientes a las funciones de objetivo empleadas en el proceso de identificación de parámetros. Para obtener unos resultados más fiables y representativos, el estudio se realiza empleando las tres rutinas de ensayo definidas, de forma que se contempla en los resultados el efecto de la respuesta en frecuencia de la celda. En la Tabla A.1 se recogen los resultados finales del estudio. Los valores de capacidades térmicas, C , están indicados en $[M/K]$ y los de conductancias, H , en $[W/K]$. Los coeficientes de apertura de los flujos de calor, A , son adimensionales.

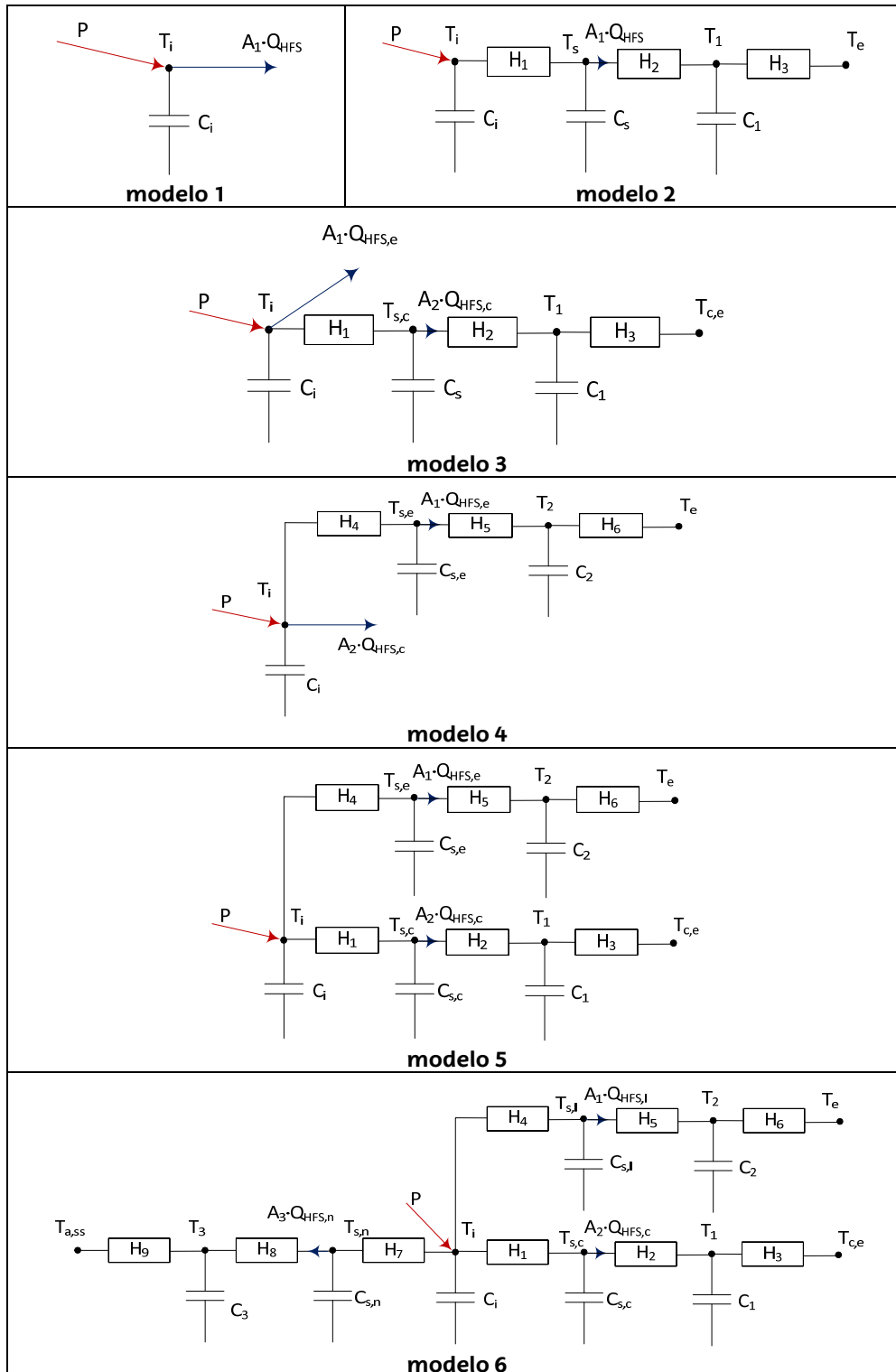


Figura A.34 – Modelos de representación del comportamiento térmico de la celda

En la memoria se realiza un análisis desarrollado del modelo 5, mostrando la definición de las ecuaciones, y estudiando la metodología de validación de los resultados del proceso de identificación de parámetros. A continuación se recogen los resultados totales para todos los modelos y las rutinas de ensayo.

	C_i	C_s	$C_{s,c}$	$C_{s,e}$	C_{cel}	C_c	C_e	H_i	$H_{i,c}$	$H_{i,e}$	H_c	H_e	A_1	A_2	A_3
modelo 1	0,651												1,075		
	0,557												1,060		
	0,595												1,046		
modelo 2	0,028	0,685			5,434			530,4							1,071
	0,324	0,355			5,329			446,6							1,042
	0,009	0,737			5,648			473,6							1,032
modelo 3		0,674	0,055			0,542		457,4	62,8		1,091		1,052	1,118	
		0,683	0,144			0,259		381,5	57,9		0,945		1,072	1,183	
		0,698	0,129			0,232		279,9	45,3		0,841		1,017	1,104	
modelo 4		0,833		0,853			3,973			334,6		5,379	1,038	1,061	
		0,705		0,405			4,992			323,6		5,135	0,983	1,331	
		0,915		0,446			4,555			234,6		3,641	1,066	1,098	
modelo 5	0,024	0,677	0,034	0,643	4,294	0,388	3,905	532,9	82,4	396,1	1,083	6,005	1,033	1,181	
	0,010	0,706	0,256	0,450	5,369	0,293	5,077	539,9	80,4	459,5	1,039	5,790	0,995	1,042	
	0,028	0,823	0,247	0,576	6,203	0,335	5,868	475,0	72,0	379,3	0,948	5,359	0,943	1,161	
modelo 6	0,022	0,750	0,282	0,470	5,871	0,631	5,240	499,1	86,1	346,5	0,906	5,977	1,035	1,176	1,057
	0,094	0,639	0,169	0,564	5,619	0,398	5,220	457,4	82,8	374,6	1,041	5,021	1,083	1,136	1,036
	0,026	0,798	0,193	0,497	5,623	0,260	5,364	364,6	62,2	311,4	0,928	5,821	0,938	1,096	1,084

Tabla A.1 – Resultados completos del proceso de identificación de parámetros en cada modelo, de arriba abajo, se indica el valor obtenido en el análisis de las rutinas PULSO, PRBS y ROLBS, respectivamente

A.3.1.1 Modelo 1

Se trata del modelo más simple, formado por un único nodo que representa el ambiente interior de la celda con una única capacidad térmica, por tanto se trata de un modelo de primer orden. En la ecuación [A.1] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.2] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$[dT_i] = [0][T_i]dt + \left[\frac{1}{C_i} \quad \frac{-A_1}{C_i} \right] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS} \end{bmatrix} dt + [\sigma_i]dW \quad [A.1]$$

$$[T_{im}] = [1][T_i(t)] + [0] \begin{bmatrix} P(t) \\ Q_{HFS}(t) \end{bmatrix} + [s_i]de(t) \quad [A.2]$$

A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas. Los valores de capacidades térmicas, C , están indicados en $[W_{10min}/K]$, y los valores de conductancias, H , en $[W/K]$.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10.0	20.0	40.0	3.18E+01	4.76E-03	6688.1	0.0024	0.0018
C_i	1.0	1000	2000	1.09E+03	1.03E+00	183.1	-0.0001	0
A_1	0.5	1.0	1.5	1.08E+00	1.04E-03	1083.8	-0.0006	0.0011
σ_i	0.0	0.01	1.0	1.07E-02	3.16E-04	33.8	0	0
s_i	0.0	0.01	1.0	6.83E-06	6.45E-07	10.5	0	0

Tabla A.2 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 1

	T_i	C_i	A_1	σ_i	s_i
T_i	1				
C_i	0.0074	1			
A_1	0.0408	-0.4075	1		
σ_i	0.0317	-0.0565	-0.0547	1	
s_i	0.0024	0.0112	0.0321	-0.5689	1

Tabla A.3 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PULSO* en el modelo 1

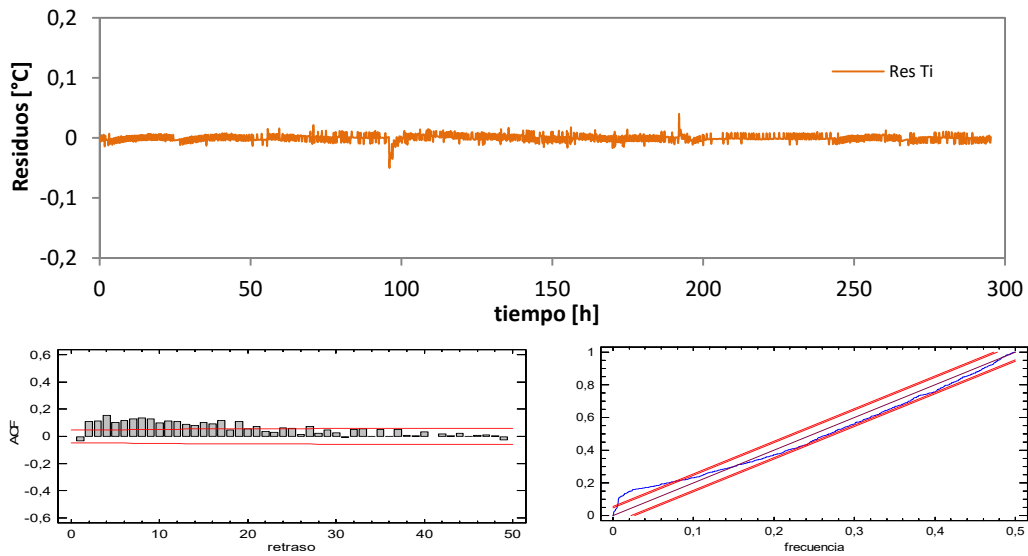


Figura A.35 – Análisis de residuos en el modelo 1 para la excitación *PULSO*

Resultados rutina *PRBS*

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10.0	20.0	40.0	2.08E+01	8.51E-03	2443.7456	0	0
C_i	1.0	1000	2000	9.28E+02	7.10E-01	227.9236	0	0
A_1	0.5	1.0	1.5	1.06E+00	1.46E-03	619.4125	0.0001	0.0001
σ_i	0.0	0.01	1.0	2.06E-02	4.16E-04	49.5406	0	0
s_i	0.0	0.01	1.0	1.04E-16	1.80E-13	0.0006	0	0

Tabla A.4 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PRBS* en el modelo 1

	T_i	C_i	A_1	σ_i	s_i
T_i	1				
C_i	0.0074	1			
A_1	0.0408	-0.4075	1		
σ_i	0.0317	-0.0565	-0.0547	1	
s_i	0.0024	0.0112	0.0321	-0.5689	1

Tabla A.5 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PRBS* en el modelo 1

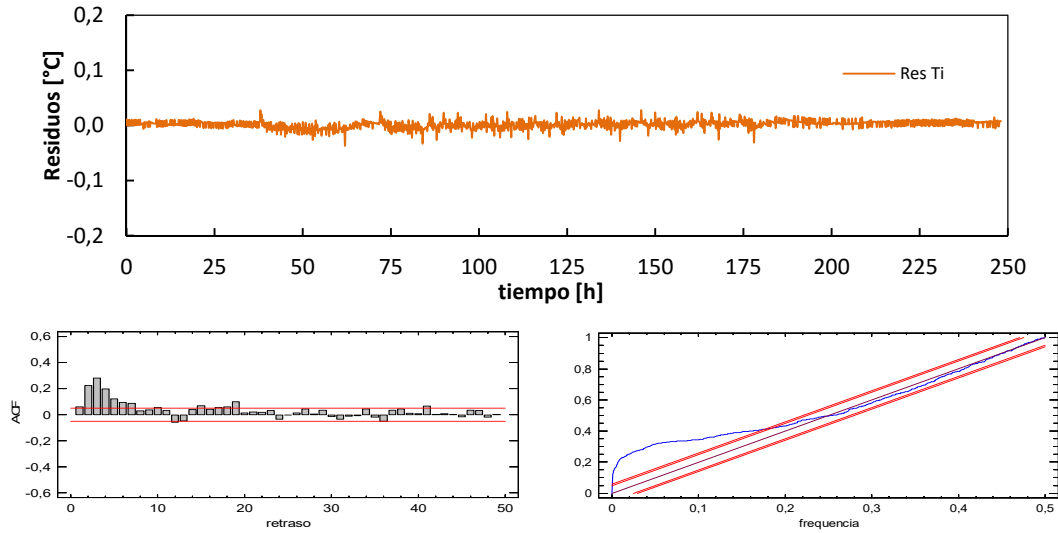


Figura A.36 – Análisis de residuos en el modelo 1 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10.0	20.0	40.0	2.42E+01	1.49E-02	1624.5772	-0.0001	0.0003
C_i	1.0	1000	2000	9.92E+02	1.75E+00	98.4324	0	0
A_1	0.5	1.0	1.5	1.05E+00	4.00E-03	223.458	0	0.0001
σ_i	0.0	0.01	1.0	1.66E-02	2.15E-03	7.7318	0	0
s_i	0.0	0.01	1.0	2.71E-17	4.59E-13	0.0001	0	0

Tabla A.6 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 1

	T_i	C_i	A_1	σ_i	s_i
T_i	1				
C_i	-0.0079	1			
A_1	0.0084	-0.1873	1		
σ_i	0.0889	-0.0089	0.0062	1	
s_i	0.0895	-0.0089	0.0036	0.0006	1

Tabla A.7 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 1

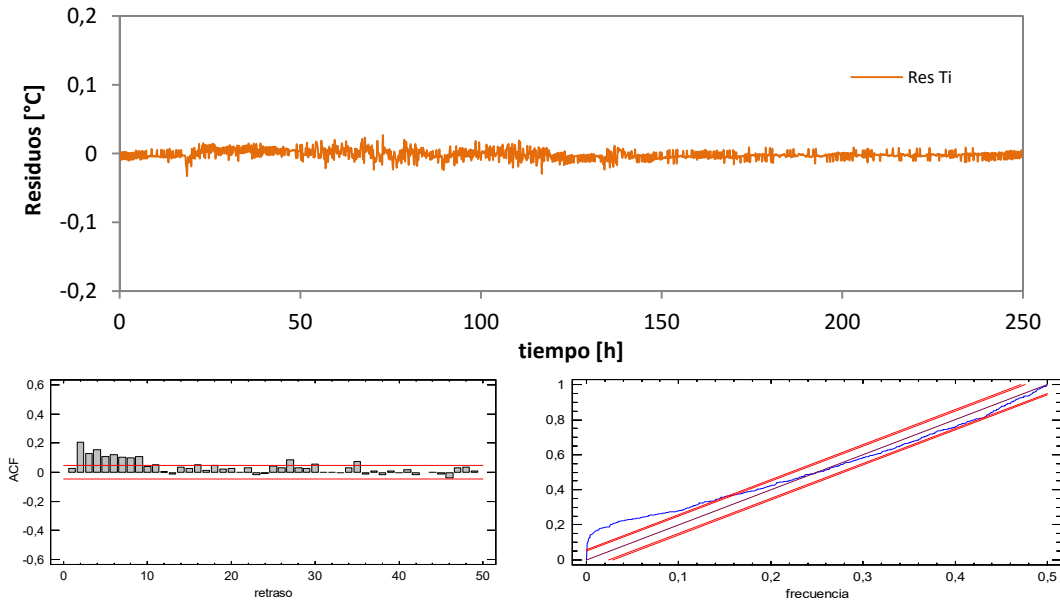


Figura A.37 – Análisis de residuos en el modelo 1 para la excitación ROLBS

A.3.1.2 Modelo 2

En el segundo modelo se hace una diferenciación entre el ambiente interior y la envolvente de la sala de ensayos. El modelo pasa a ser de tercer orden y permite estimar las propiedades térmicas de la estructura de la celda. En la ecuación [A.3] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.4] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_s \\ dT_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{H_1}{c_i} & \frac{-H_1}{c_i} & 0 \\ \frac{H_1}{c_s} & \frac{-(H_1+H_2)}{c_s} & \frac{H_2}{c_s} \\ 0 & \frac{H_2}{c_1} & \frac{-(H_2+H_3)}{c_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_s \\ T_1 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{1}{c_i} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{c_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_e \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \sigma_i & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_s & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 \end{bmatrix} dW \quad [A.3]$$

$$\begin{bmatrix} T_{im} \\ T_{sm} \\ Q_{HFsm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{A_1} & \frac{-H_2}{A_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i(t) \\ T_s(t) \\ T_1(t) \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P(t) \\ T_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_i & 0 & 0 \\ 0 & s_{s,c} & 0 \\ 0 & 0 & s_1 \end{bmatrix} de(t) \quad [A.4]$$

El siguiente nivel de modelado de la celda, aún siendo sencillo, se complica en gran medida respecto a modelo 1. De ahí el interés de obtener un diseño de celda que responda al modelo más sencillo, de forma que se puede emplear toda la potencialidad de las herramientas de identificación de parámetros al estudio de la probeta bajo ensayo. A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	3.18E+01	4.67E-02	680.6374	-0.00188	0.0018
T_s	10	20	40	3.18E+01	5.45E-03	5828.6817	-0.0055	0.0018
T_1	10	20	40	2.93E+01	1.03E-01	284.4967	-0.0073	0.0009
H_1	100	500	1000	5.30E+02	5.50E+00	96.5017	0.00043	0.0002
C_i	1	10	2000	4.67+01	1.59E-01	16.4626	-0.2742	-0.0001
C_s	1	1000	2000	1.14E+03	1.42E+00	134.1095	-0.09257	0.0001
H_2	5	10	500	2.70E+01	1.04E+00	25.8197	0.0029	0
C_1	1000	1500	5000	9.06E+03	4.16E+01	36.2743	-0.0757	-0.0005
H_3	5	10	100	8.68E+00	7.24E-01	11.9897	0.0046	-0.0003
A_1	0.5	1	1.5	1.07E+00	1.49E-03	757.6803	-0.0011	0.0011

Tabla A.8 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 2

	T_i	T_s	T_1	H_1	C_i	C_s	H_2	C_1	H_3	A_1
T_i	1									
T_s	0.27	1								
T_1	-0.34	-0.23	1							
H_1	-0.14	-0.34	0.13	1						
C_i	-0.11	-0.27	0.14	0.18	1					
C_s	-0.26	-0.16	0.31	0.10	0.14	1				
H_2	-0.36	-0.26	0.19	0.14	0.14	0.29	1			
C_1	-0.33	-0.24	0.24	0.11	0.24	0.19	0.26	1		
H_3	-0.13	-0.34	0.11	0.19	0.16	0.36	0.12	0.13	1	
A_1	-0.25	-0.17	0.28	0.10	0.19	-0.16	0.32	0.31	0.10	1

Tabla A.9 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 2

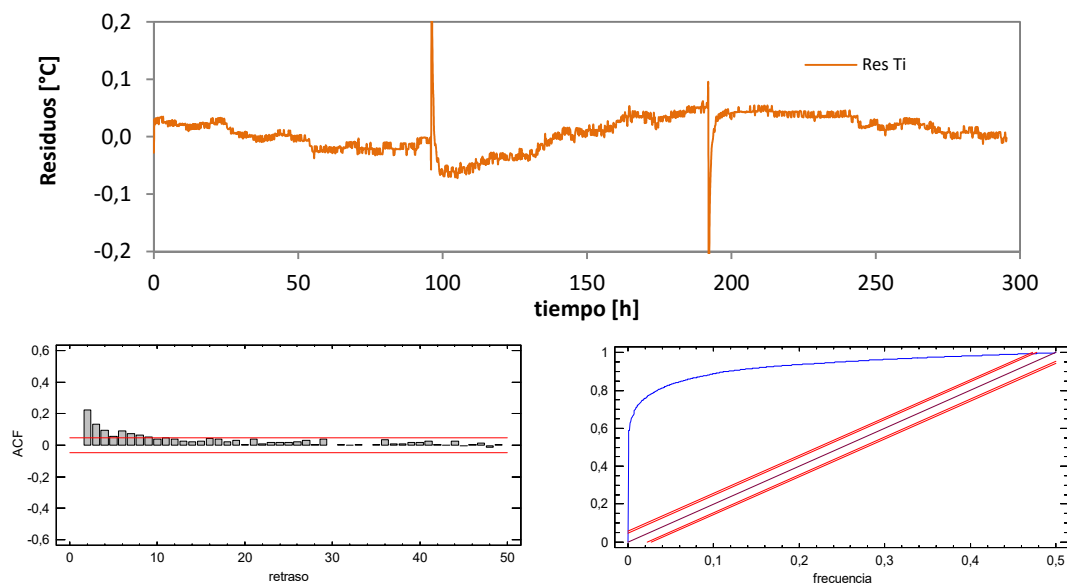


Figura A.38 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PULSO

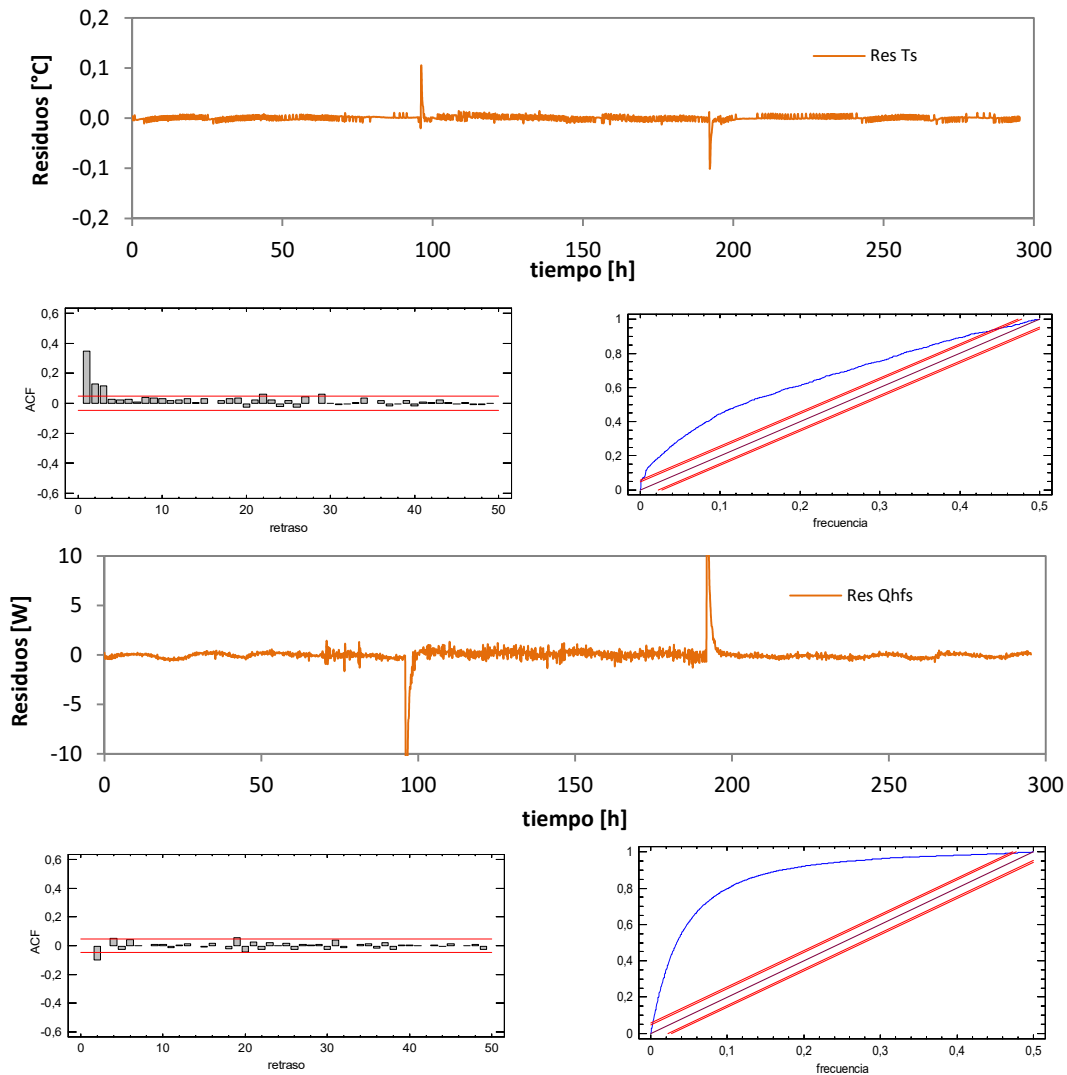


Figura A.39 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	1.99E+01	5.61E-02	354.9914	0.0066	0
T_s	10	20	40	2.07E+01	1.66E-02	1242.2585	-0.0097	0
T_1	10	20	40	2.04E+01	6.15E-02	331.4612	0.0007	0
H_1	100	500	1000	4.47E+02	1.34E+00	334.1442	0.0005	0.0001
C_i	1	10	2000	5.40E+02	1.13E+00	79.6618	0.0008	0.009
C_s	1	1000	2000	5.91E+02	1.67E+00	58.9762	0.0001	-0.0002
H_2	5	10	500	1.76E+02	3.50E+00	50.2624	0	0.0001
C_1	1000	5000	10000	8.88E+03	1.64E+01	39.3346	0	-0.0015
H_3	5	10	100	6.45E+00	1.24E-01	52.2507	0	-0.0015
A_1	0.5	1	1.5	1.04E+00	1.17E-03	760.5452	0.0017	0.0001

Tabla A.10 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 2

	T_i	T_s	T_1	H_1	C_i	C_s	H_2	C_1	H_3	A_1
T_i	1									
T_s	0.19	1								
T_1	0.09	0.48	1							
H_1	-0.05	0.02	0.01	1						
C_i	0.12	0.03	0.01	-0.25	1					
C_s	-0.11	-0.03	0.00	0.30	-0.89	1				
H_2	0.08	-0.05	0.08	-0.04	0.12	-0.10	1			
C_1	-0.01	0.02	0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.12	1		
H_3	-0.08	0.03	0.00	0.04	-0.03	0.01	-0.04	-0.02	1	
A_1	-0.01	0.02	0.01	0.16	0.11	-0.25	0.09	0.05	0.08	1

Tabla A.11 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 2

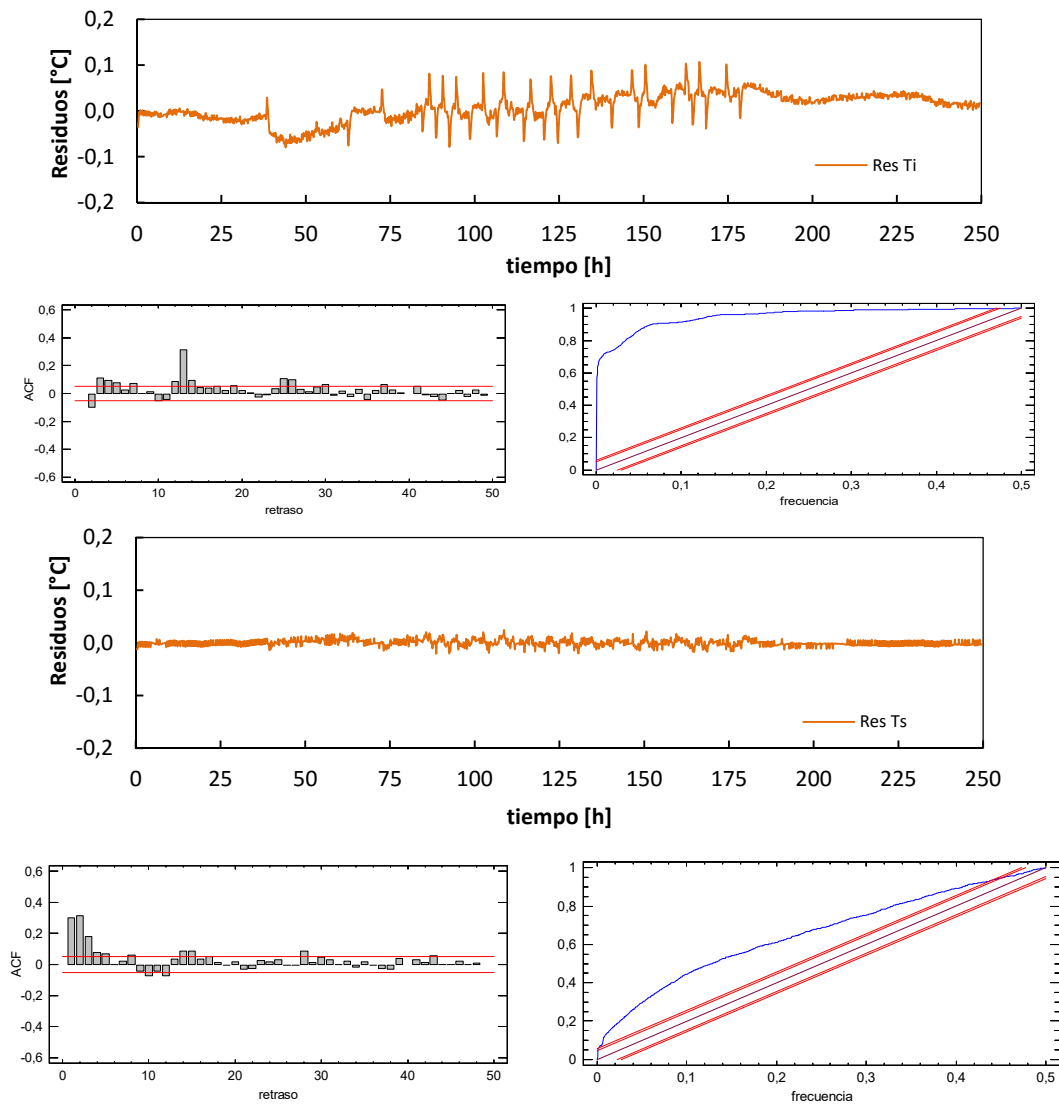


Figura A.40 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PRBS

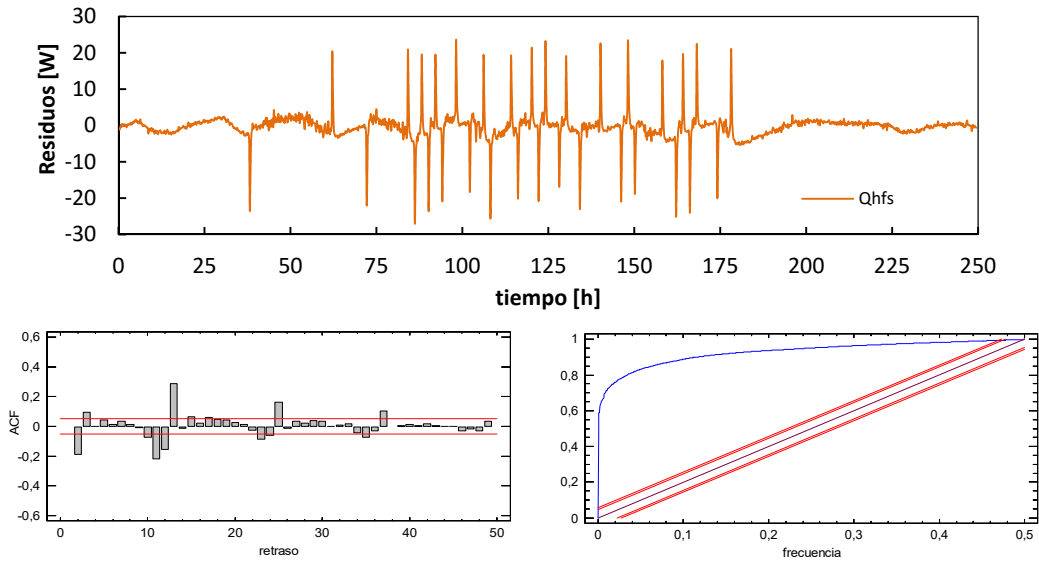


Figura A.41 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.42E+01	1.36E-02	1780.8776	0.0066	0
T_s	10	20	40	2.41E+01	4.70E-03	5128.6979	-0.0097	0
T_1	10	20	40	2.38E+01	1.79E-02	1331.7085	0.0007	0
H_1	100	500	1000	4.74E+02	1.20E+00	396.1788	0.0005	0.0001
C_i	1	10	2000	1.50E+01	1.50E+00	63.0633	0.0008	0.009
C_s	1	1000	2000	1.23E+03	2.17E+00	53.7641	0.0001	-0.0002
H_2	5	10	500	2.10E+02	5.35E+00	39.3135	0	0.0001
C_1	1000	5000	10000	9.41E+03	1.96E+01	37.6009	0	-0.0015
H_3	5	10	100	6.74E+00	1.13E-01	59.8046	0	-0.0015
A_1	0.5	1	1.5	1.03E+00	1.19E-03	740.8563	0.0017	0.0001

Tabla A.12 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 2

	T_i	T_s	T_1	H_1	C_i	C_s	H_2	C_1	H_3	A_1
T_i	1									
T_s	0.34	1								
T_1	0.09	0.42	1							
H_1	0.00	0.02	-0.02	1						
C_i	0.01	0.00	0.03	-0.19	1					
C_s	-0.03	0.00	-0.04	0.22	-0.84	1				
H_2	0.02	0.00	0.43	-0.01	0.16	-0.17	1			
C_1	-0.01	-0.01	-0.02	0.02	-0.02	0.01	-0.07	1		
H_3	0.01	0.03	0.04	0.01	0.03	-0.02	0.02	0.14	1	
A_1	0.00	-0.01	0.01	0.27	0.05	-0.19	0.09	0.02	0.10	1

Tabla A.13 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 2

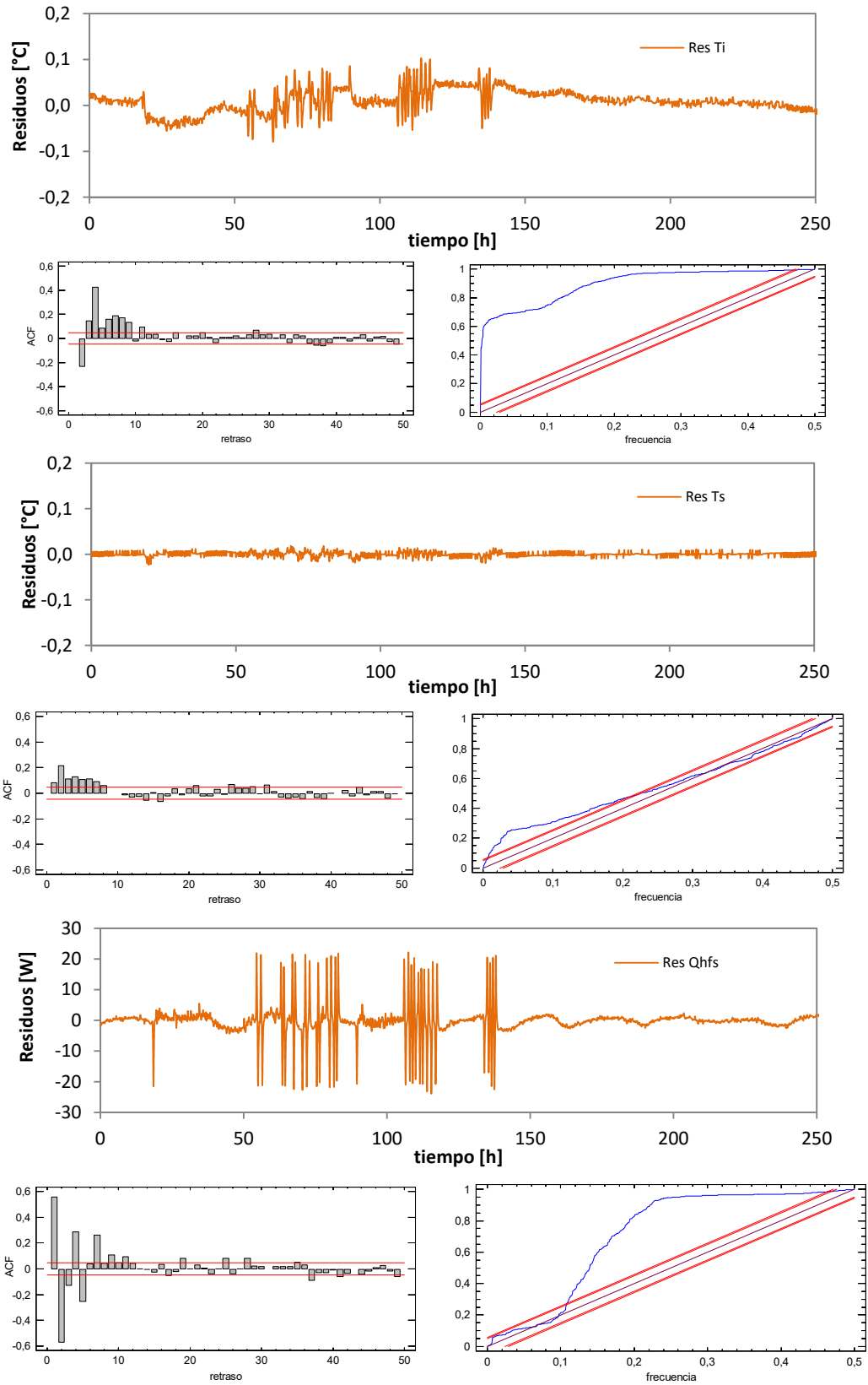


Figura A.42 – Análisis de residuos en el modelo 2 para la excitación ROLBS

A.3.1.3 Modelo 3

Tras analizar los resultados del modelo 2, se puede ver que aunque los residuos son pequeños en todas las variables objetivo, el ajuste al patrón de ruido blanco no es muy correcto. Esto se puede deber a la diferencia en el comportamiento del muro de calibración respecto al resto de la envolvente de la sala de ensayos. Aunque la superficie de dicho muro de calibración es un porcentaje pequeño, el flujo es muy superior debido a que presenta mayores efectos de puentes térmicos, esto además también afecta a las temperaturas superficiales del mismo, que se diferencian de las temperaturas del resto de la envolvente. Para verificar este comportamiento previsto se define el modelo 3. En el cual se hace una discretización del flujo y temperatura de la envolvente propia de la sala de ensayos y del muro de calibración por separado. En la ecuación [A.5] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.6] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{H_1}{C_i} & \frac{H_1}{C_i} & 0 \\ \frac{H_1}{C_{s,c}} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_{s,c}} \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & -(H_2 + H_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} 1 & -\frac{A_1}{C_i} & 0 \\ \frac{1}{C_i} & \frac{-A_1}{C_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt \quad [A.5]$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,c}^m \\ Q_{HFS,c}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{A_2} & \frac{-H_2}{A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} + [e] \quad [A.6]$$

A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	3.18E+01	6.07E-03	5242.4619	0.0035	0.0018
$T_{s,c}$	10	20	40	3.18E+01	4.35E-03	7309.1254	-0.0099	0.0018
T_1	10	20	40	2.85E+01	1.95E-01	146.5964	0.0018	0.0008
H_1	1	50	500	6.28E+01	2.80E+00	22.2818	-0.0006	0
C_i	10	1000	2000	9.57E+02	3.05E+01	58.8331	0.0007	0.0082
$C_{s,c}$	1	50	500	9.17E+01	2.96E+00	5.1764	0.0001	-0.0005
H_2	0.1	10	1000	3.66E+00	2.61E-01	14.0308	0	0
C_1	1	1000	2000	9.03E+02	1.05E+01	14.3876	0	0
H_3	0.1	6	100	1.55E+00	1.06E-01	14.7018	-0.0001	0
A_1	1	1.2	1.5	1.05E+00	7.96E-03	139.1471	0.0077	-0.0085
A_2	0.5	1	1.5	1.12E+00	5.21E-02	24.5885	0.0022	0.0039

Tabla A.14 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 3

	T_i	$T_{s,c}$	T_1	H_1	C_i	$C_{s,c}$	H_2	C_1	H_3	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,c}$	0.21	1									
T_1	0.00	0.01	1								
H_1	-0.04	0.01	0.02	1							
C_i	0.09	0.01	-0.03	0.01	1						
$C_{s,c}$	-0.11	-0.01	0.01	0.36	-0.29	1					
H_2	-0.01	0.00	0.27	0.18	0.07	0.15	1				
C_1	-0.01	0.00	-0.15	0.17	0.06	0.15	0.20	1			
H_3	-0.02	0.00	-0.50	0.18	0.11	0.13	-0.07	0.23	1		
A_1	0.01	-0.01	0.01	-0.30	-0.17	-0.24	-0.19	-0.18	-0.20	1	
A_2	-0.01	0.01	-0.01	0.31	0.15	0.25	0.19	0.18	0.20	-0.33	1

Tabla A.15 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PULSO* en el modelo 3

En las tablas de resultados y coeficientes de covarianza no se muestran los datos correspondientes al comportamiento estadístico de las variables de estado, $[\sigma]$, y el error de las funciones objetivo, $[e]$, ya que aumenta en gran medida la dimensión de dichas tablas, sí que se analiza en la validación del modelo.

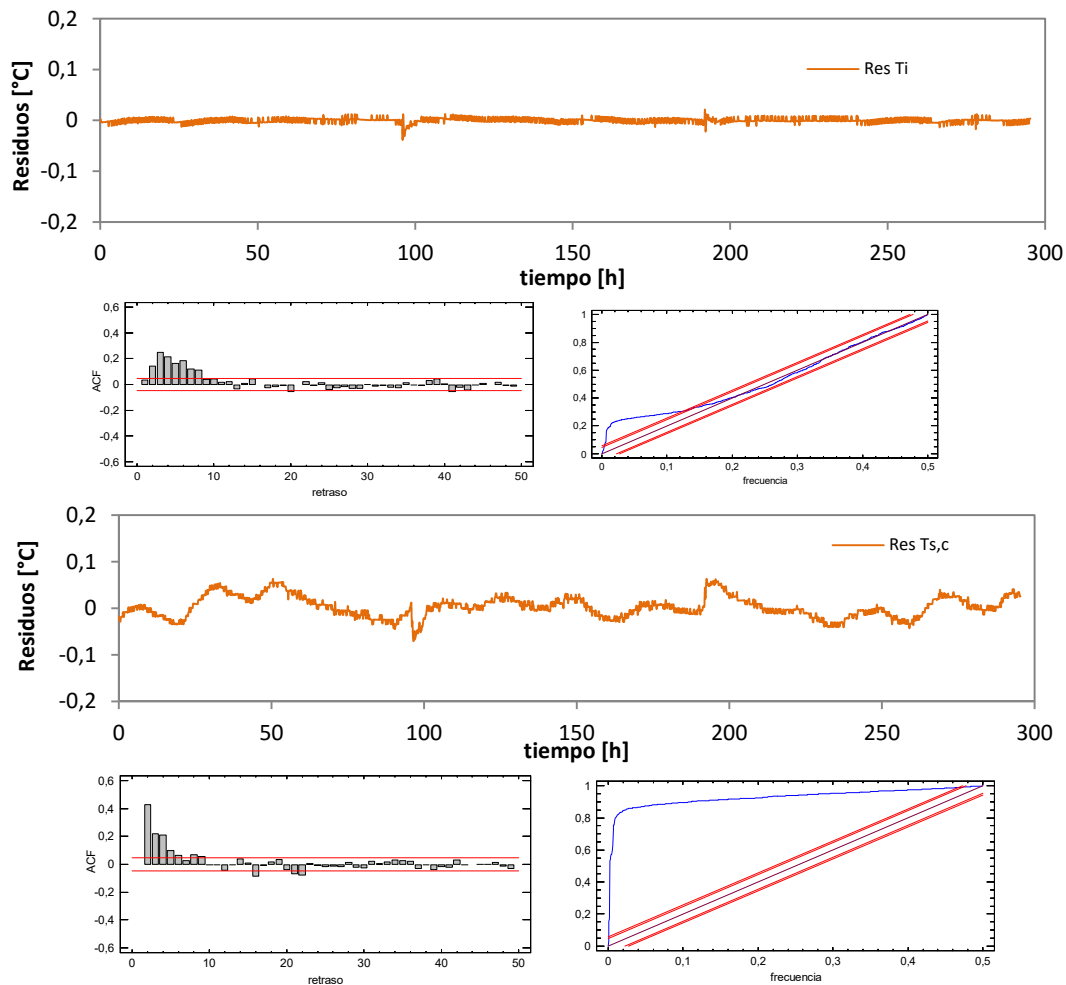


Figura A.43 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación *PULSO*

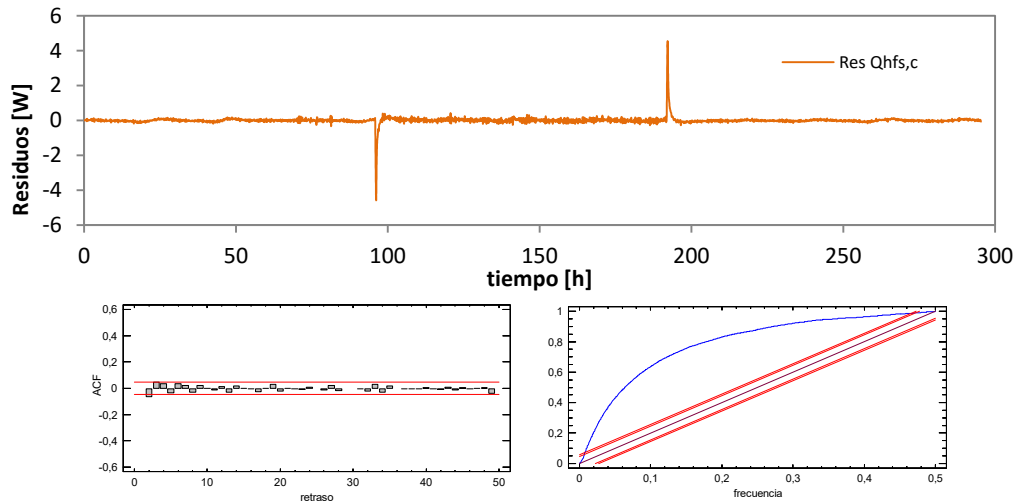


Figura A.44 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.08E+01	6.53E-03	3182.0883	-0.0005	0
$T_{s,c}$	10	20	40	2.07E+01	2.63E-02	785.3445	-0.0005	0
T_1	10	20	40	2.03E+01	3.39E-02	597.7475	0.0002	0
H_1	1	50	500	5.79E+01	1.81E+00	32.066	-0.0001	0
C_i	10	1000	2000	9.72E+02	7.47E-01	210.1	-0.0006	0.0016
$C_{s,c}$	1	50	500	2.40E+02	1.98E+00	20.1673	0	0
H_2	0.1	10	1000	1.70E+01	5.70E-01	29.9114	0	0
C_1	1	1000	2000	4.32E+02	4.16E+00	17.3047	0	0
H_3	0.1	6	100	1.00E+00	2.58E-02	28.078	0	0
A_1	1	1.2	1.5	1.07E+00	4.24E-03	215.8239	-0.0004	0.0001
A_2	0.5	1	1.5	1.18E+00	2.09E-02	32.0907	0.0001	-0.001

Tabla A.16 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 3

	T_i	$T_{s,c}$	T_1	H_1	C_i	$C_{s,c}$	H_2	C_1	H_3	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,c}$	0.11	1									
T_1	0.01	0.08	1								
H_1	0.03	0.02	-0.20	1							
C_i	-0.01	-0.05	0.04	-0.26	1						
$C_{s,c}$	0.03	0.04	-0.18	0.22	-0.47	1					
H_2	0.01	0.05	0.19	0.40	-0.21	-0.02	1				
C_1	0.01	0.03	-0.11	0.21	-0.40	0.32	0.40	1			
H_3	-0.02	0.01	-0.14	0.42	-0.21	0.07	0.07	0.43	1		
A_1	-0.04	-0.02	0.22	-0.32	0.23	-0.20	-0.35	-0.21	-0.38	1	
A_2	0.02	0.03	-0.18	0.29	-0.25	0.35	0.18	0.23	0.17	-0.28	1

Tabla A.17 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 3

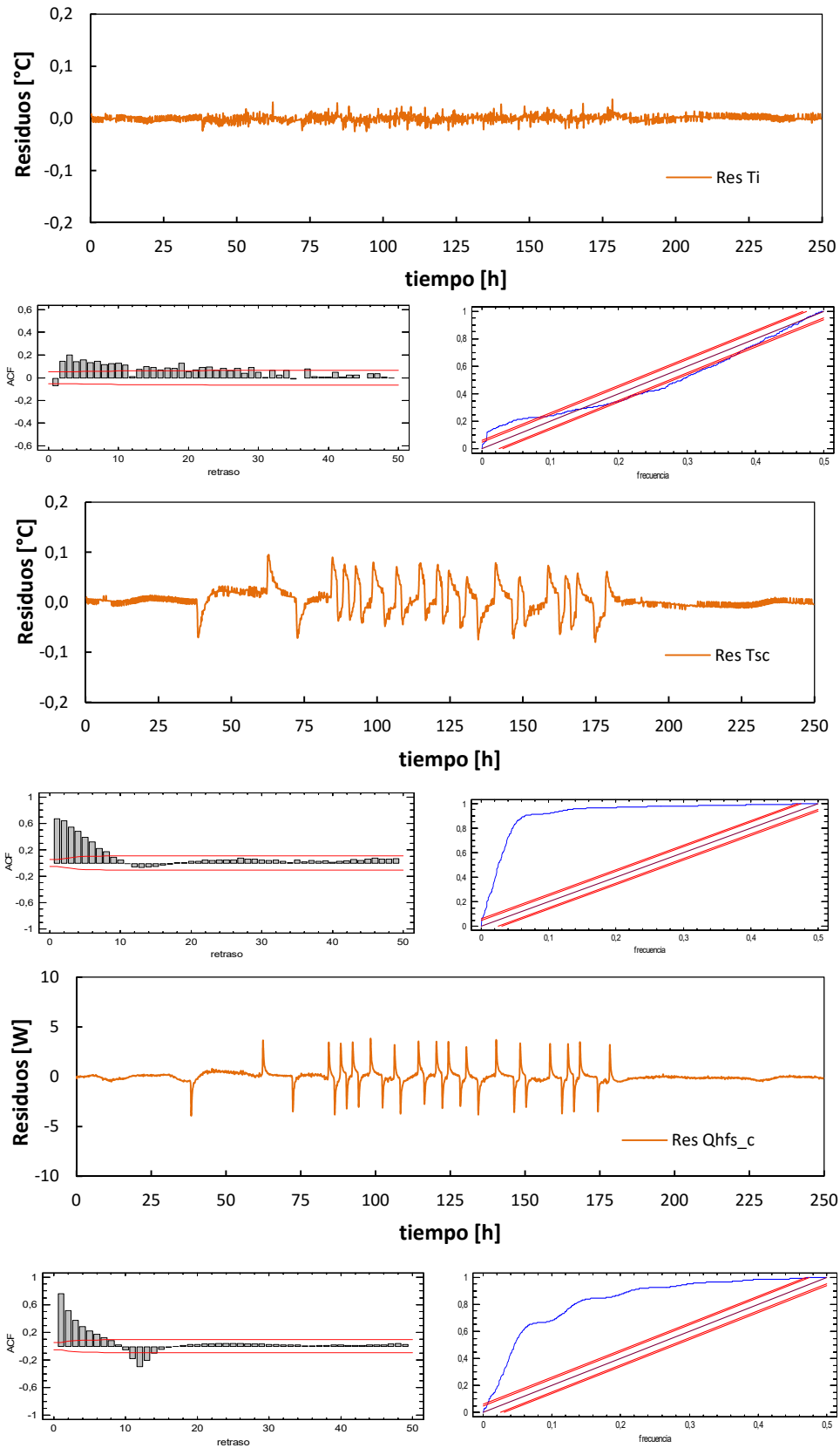


Figura A.46 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.42E+01	5.78E-03	4188.7538	-0.0042	0.0003
$T_{s,c}$	10	20	40	2.41E+01	1.47E-02	1636.5513	-0.004	0.0003
T_1	10	20	40	2.36E+01	4.05E-02	583.6111	0	0.0002
H_1	1	50	500	4.53E+01	4.54E+00	9.9741	-0.0003	0
C_i	10	1000	2000	9.97E+02	1.06E+00	156.074	0.0001	0.0027
$C_{s,c}$	1	50	500	2.15E+02	3.60E+00	9.9292	0	0
H_2	0.1	10	1000	1.41E+01	1.59E+00	8.8728	-0.0001	0
C_1	1	1000	2000	3.87E+02	7.36E+00	8.7735	0	0
H_3	0.1	6	100	8.94E-01	6.60E-02	9.3378	0	0
A_1	1	1.2	1.5	1.02E+00	1.01E-02	93.5165	0.0001	0.0002
A_2	0.5	1	1.5	1.10E+00	5.25E-02	9.8373	0.0004	-0.0961

Tabla A.18 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 3

	T_i	$T_{s,c}$	T_1	H_1	C_i	$C_{s,c}$	H_2	C_1	H_3	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,c}$	0.07	1									
T_1	0.01	0.06	1								
H_1	-0.08	-0.17	-0.01	1							
C_i	0.05	0.12	-0.02	-0.25	1						
$C_{s,c}$	-0.08	-0.18	-0.01	0.32	-0.24	1					
H_2	-0.07	-0.15	0.26	0.30	-0.23	0.28	1				
C_1	-0.07	-0.15	-0.02	0.29	-0.22	0.27	0.26	1			
H_3	-0.07	-0.16	0.00	0.31	-0.23	0.30	0.28	0.28	1		
A_1	0.08	0.18	0.01	-0.33	0.24	-0.32	-0.29	-0.28	-0.31	1	
A_2	-0.08	-0.18	0.00	0.33	-0.25	0.32	0.30	0.29	0.31	-0.33	1

Tabla A.19 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 3

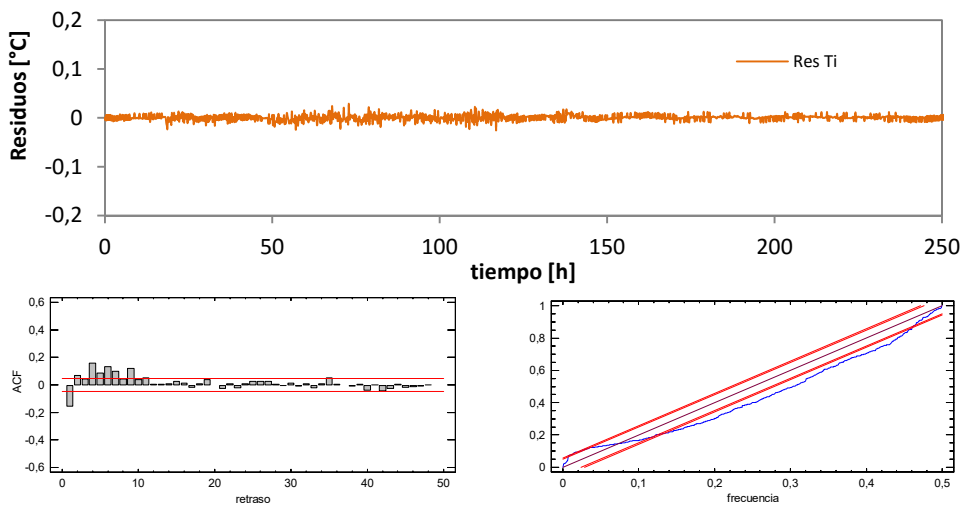


Figura A.47 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación ROLBS

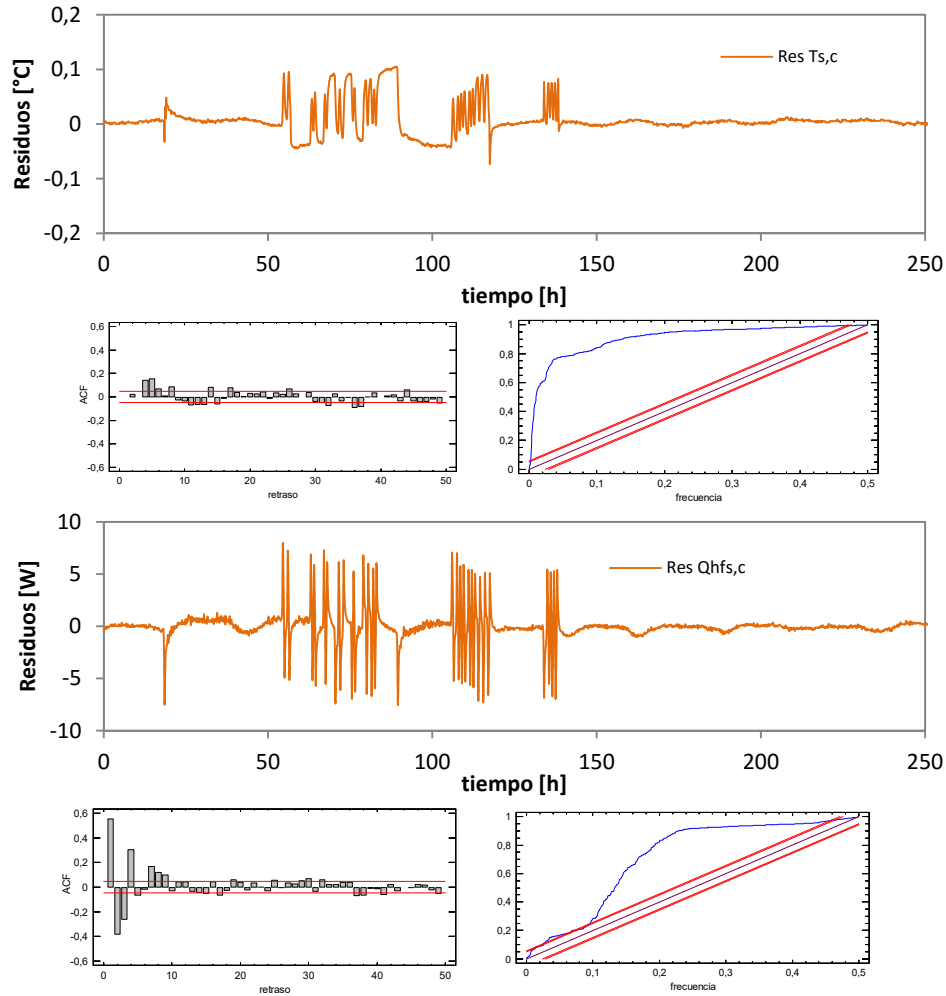


Figura A.48 – Análisis de residuos en el modelo 3 para la excitación ROLBS

A.3.1.4 Modelo 4

El modelo 4 es un modelo idéntico al modelo 3 pero que intercambia los flujos de calor empleados como variable de entrada y función objetivo. Ahora se emplea el flujo de calor a través del muro de calibración, $Q_{HFS,c}$, como variable de excitación del modelo y el flujo de la envolvente, $Q_{HFS,e}$, como función de ajuste. Esto permite estimar las propiedades térmicas de la envolvente propia de la sala de ensayos. En la ecuación [A.7] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.8] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,e} \\ dT_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{H_1}{C_i} & \frac{H_1}{C_i} & 0 \\ \frac{H_1}{C_{s,e}} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_{s,e}} \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & -(H_2 + H_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,e} \\ T_1 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & -\frac{A_2}{C_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,c} \\ T_e \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt \quad [A.7]$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,e}^m \\ Q_{HFS,e}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{A_1} & \frac{-H_2}{A_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,e} \\ T_1 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,c} \\ T_e \end{bmatrix} + [e] \quad [A.8]$$

A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T _i	10	20	40	3.18E+01	2.06E-02	1548.1391	-0.006	0.0018
T _{s,e}	10	20	40	3.18E+01	3.60E-03	8841.3479	-0.0071	0.0018
T ₂	10	20	40	2.87E+01	3.47E-02	827.2679	-0.0053	0.0008
H ₄	10	500	1000	3.35E+02	8.23E-01	406.431	0	0
C _i	1	100	500	3.05E+02	7.96E-03	212.8658	-0.009	-0.0004
C _{s,e}	10	1000	3000	1.42E+03	1.46E-01	1618.785	-0.0072	0.0018
H ₅	1	10	1000	1.44E+01	8.67E-02	166.4019	-0.0979	0
C ₂	1	5000	10000	6.62E+03	2.47E+00	446.071	0.0002	0.0001
H ₆	1	6	100	8.58E+00	1.09E-01	49.2945	-0.0009	0
A ₁	0.5	1.2	1.5	1.04E+00	1.89E-02	145.4758	-0.0005	0.0002
A ₂	0.5	1.2	1.5	1.06E+00	2.90E-03	304.334	-0.0252	0.0004

Tabla A.20 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 4

	T _i	T _{s,e}	T ₂	H ₄	C _i	C _{s,e}	H ₅	C ₂	H ₆	A ₁	A ₂
T _i	1										
T _{s,e}	0.13	1									
T ₂	-0.02	0.07	1								
H ₄	0.03	-0.11	-0.40	1							
C _i	0.02	-0.05	-0.40	-0.04	1						
C _{s,e}	0.02	-0.01	0.19	0.31	-0.46	1					
H ₅	0.01	0.06	0.21	-0.25	-0.25	0.45	1				
C ₂	0.04	0.02	0.44	0.05	-0.20	0.24	0.26	1			
H ₆	-0.04	0.04	-0.03	-0.01	-0.32	-0.37	-0.01	-0.42	1		
A ₁	-0.03	0.09	0.41	-0.27	0.04	-0.25	0.21	-0.03	-0.02	1	
A ₂	0.01	-0.15	-0.43	0.26	-0.01	0.24	-0.20	0.05	-0.04	-0.31	1

Tabla A.21 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 4

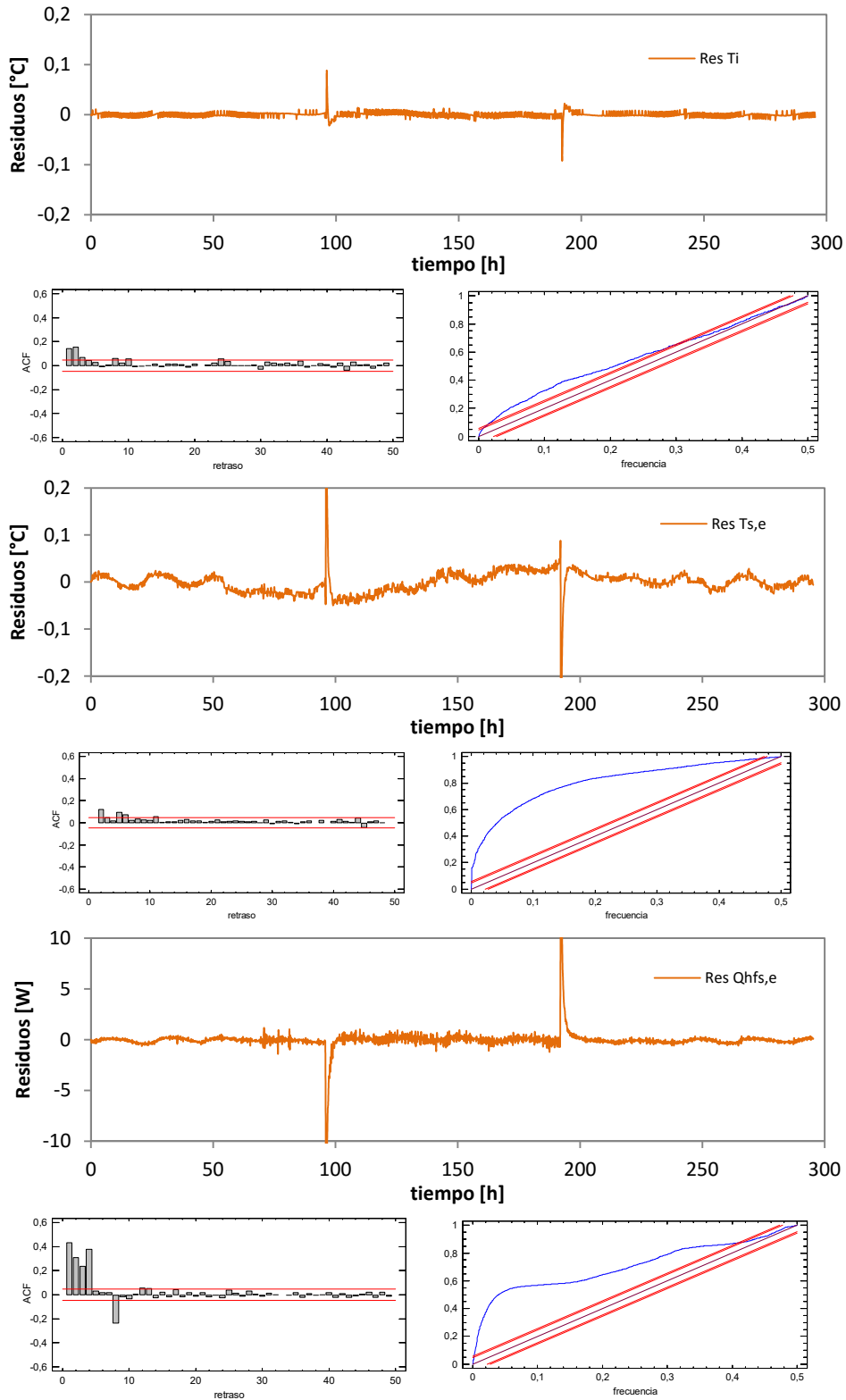


Figura A.49 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.07E+01	3.33E-02	620.7915	-0.0001	0
$T_{s,e}$	10	20	40	2.07E+01	9.17E-03	2255.0561	-0.0053	0
T_2	10	20	40	2.04E+01	2.03E-02	1006.5585	0.0005	0
H_4	10	500	1000	3.24E+02	3.44E+00	94.1898	0	0
C_i	1	100	500	2.92E+02	1.12E+00	80.6075	-0.0001	0.0099
$C_{s,e}$	10	1000	3000	6.75E+02	2.05E+00	54.8512	0	0.0003
H_5	1	10	1000	1.42E+02	3.31E+00	43.0395	0	0
C_2	1	5000	10000	8.32E+03	1.61E+01	34.3079	0	0
H_6	1	6	100	5.34E+00	1.23E-01	41.6774	0	0
A_1	0.5	1.2	1.5	9.83E-01	5.67E-02	20.0609	0	0.0012
A_2	0.5	1.2	1.5	1.31E+00	9.41E-03	89.3373	-0.0001	-0.0001

Tabla A.22 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 4

	T_i	$T_{s,e}$	T_2	H_4	C_i	$C_{s,e}$	H_5	C_2	H_6	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,e}$	0.33	1									
T_2	0.01	0.16	1								
H_4	-0.06	-0.07	0.00	1							
C_i	0.17	0.39	0.03	-0.25	1						
$C_{s,e}$	-0.20	-0.49	-0.02	0.31	-0.25	1					
H_5	-0.04	0.04	0.24	0.50	0.05	0.00	1				
C_2	-0.02	0.02	-0.03	0.39	-0.13	0.11	0.11	1			
H_6	0.00	0.03	0.01	0.46	-0.05	0.05	0.23	0.18	1		
A_1	0.04	0.03	0.00	-0.32	0.16	-0.22	-0.18	-0.39	-0.47	1	
A_2	-0.03	0.03	0.00	0.32	-0.13	0.14	0.18	0.40	0.48	-0.33	1

Tabla A.23 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 4

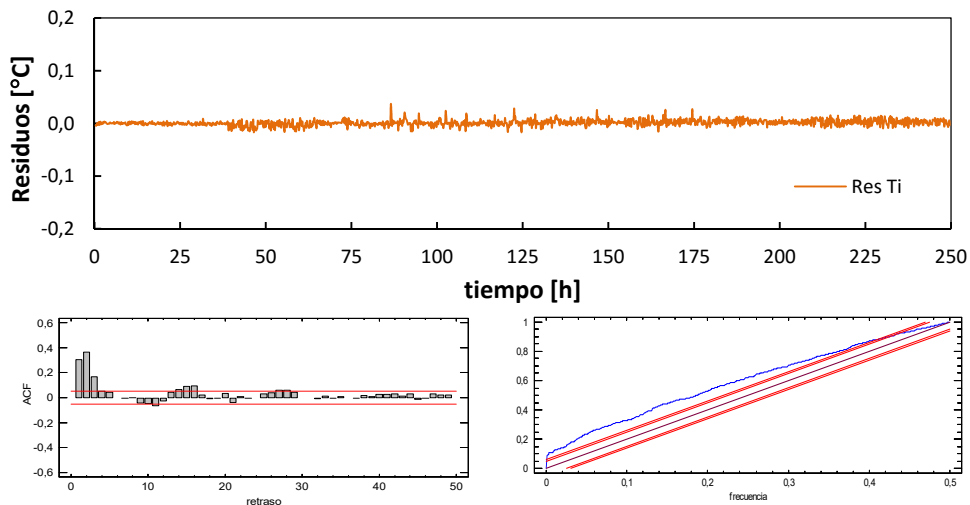


Figura A.50 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación PRBS

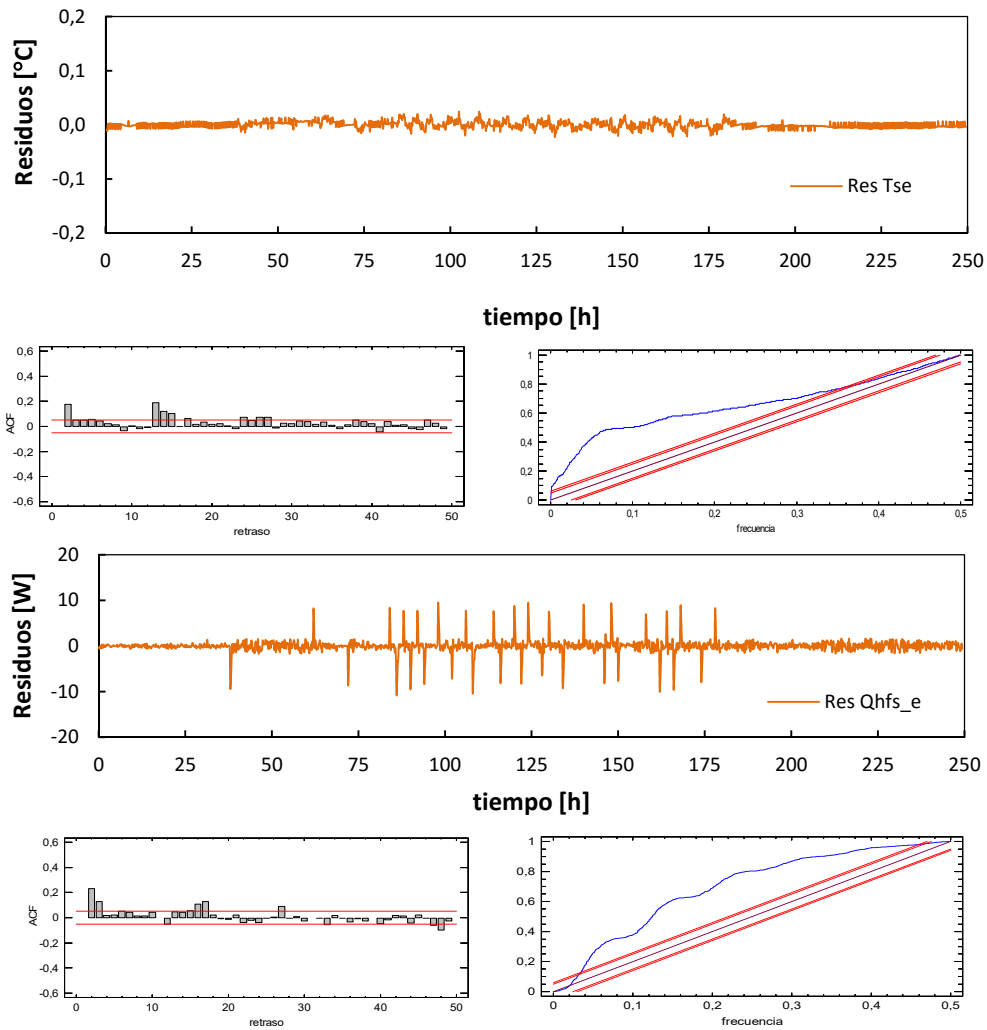


Figura A.51 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T_i	10	20	40	2.42E+01	9.25E-03	2619.7522	-0.0001	0.0003
$T_{s,e}$	10	20	40	2.41E+01	8.71E-02	277.2572	0.0004	0.0003
T_2	10	20	40	2.38E+01	2.20E-02	1085.2363	0	0.0002
H_4	10	500	1000	2.35E+02	4.90E+00	47.8826	0	0
C_i	1	100	500	3.25E+02	2.08E+00	65.906	-0.0001	0.0007
$C_{s,e}$	10	1000	3000	7.43E+02	1.02E+01	12.114	0	0.0004
H_5	1	10	1000	1.03E+02	7.90E+00	13.078	0	0
C_2	1	5000	10000	7.59E+03	5.47E+01	7.8946	0	0
H_6	1	6	100	3.77E+00	9.15E-02	39.806	0	0
A_1	0.5	1.2	1.5	1.07E+00	4.44E-02	59.5866	0	0.0002
A_2	0.5	1.2	1.5	1.10E+00	6.90E-03	81.5508	0	-0.0071

Tabla A.24 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 4

	T_i	$T_{s,e}$	T_2	H_4	C_i	$C_{s,e}$	H_5	C_2	H_6	A_1	A_2
T_i	1										
$T_{s,e}$	0.25	1									
T_2	-0.11	-0.44	1								
H_4	-0.21	-0.30	0.40	1							
C_i	-0.20	-0.27	0.36	0.20	1						
$C_{s,e}$	-0.22	-0.33	0.43	0.31	0.26	1					
H_5	-0.21	-0.30	0.20	0.29	0.24	0.30	1				
C_2	0.22	0.32	-0.45	-0.28	-0.27	-0.32	-0.30	1			
H_6	-0.11	-0.49	0.20	0.20	0.31	0.17	0.48	-0.43	1		
A_1	0.17	0.24	-0.32	-0.31	-0.42	-0.26	-0.24	0.22	-0.20	1	
A_2	-0.15	-0.21	0.29	0.30	0.32	0.23	0.22	-0.19	0.20	-0.31	1

Tabla A.24 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 4

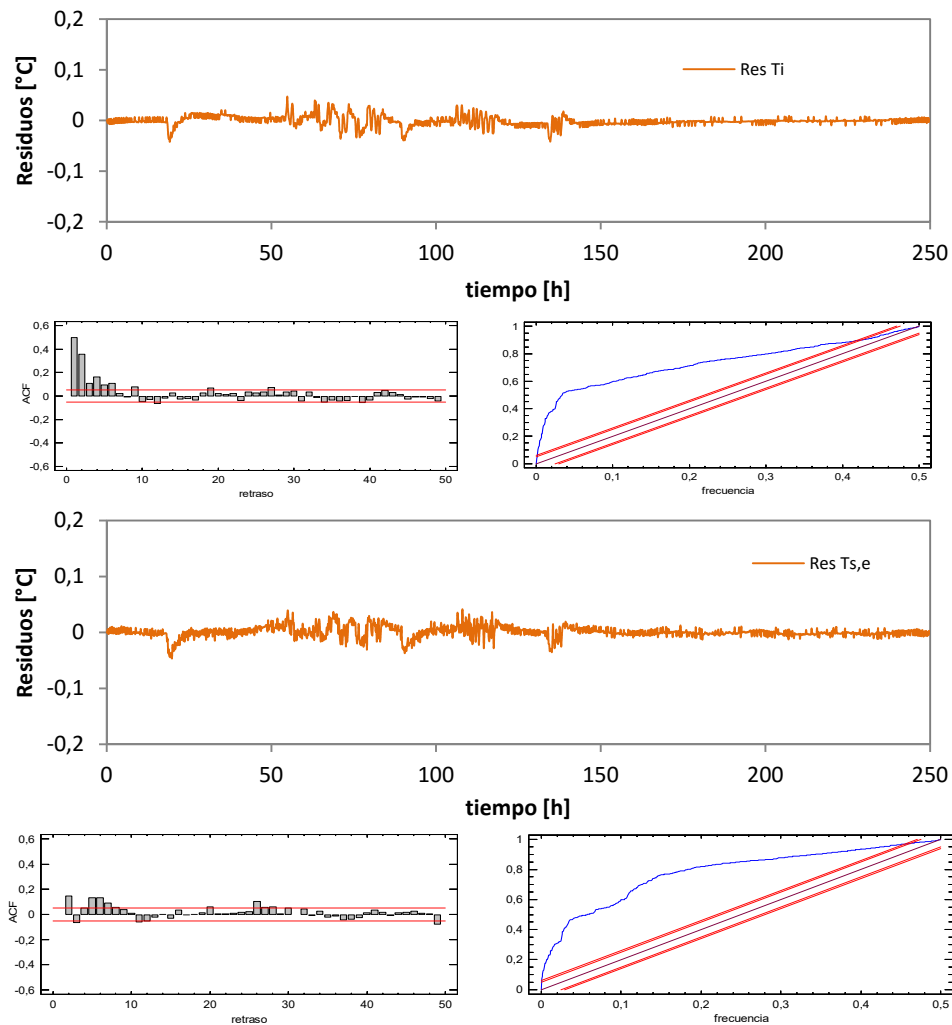


Figura A.52 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación ROLBS

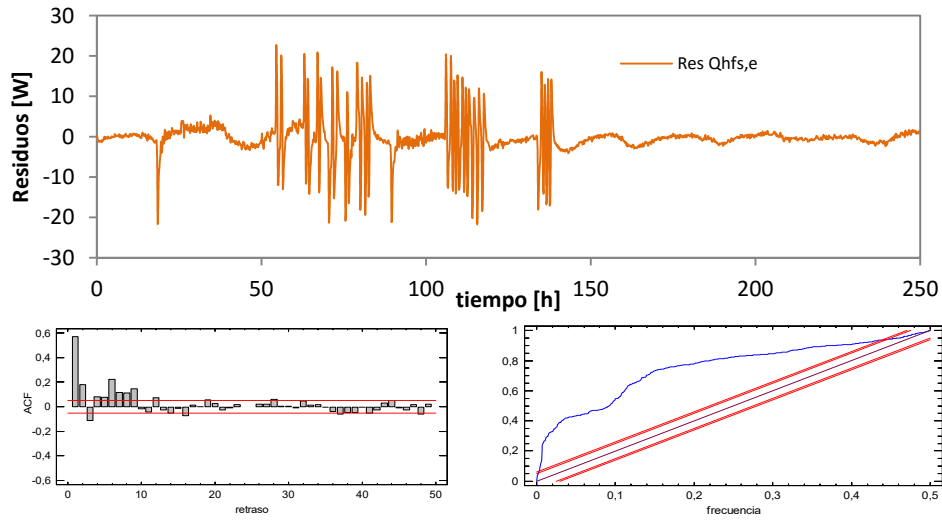


Figura A.53 – Análisis de residuos en el modelo 4 para la excitación ROLBS

A.3.1.5 Modelo 5

En el modelo 5 se analiza simultáneamente la rama de la envolvente y la rama correspondiente al muro de calibración. El modelo comienza a ser de relativa complejidad al tratarse de un modelo de orden cinco, pero su estudio se puede llevar a cabo gracias a el análisis realizado en los modelos 3 y 4, de forma que se disponen de resultados previos de los parámetros que se pueden emplear como valores iniciales y se puede ajustar el intervalo de estudio de los mismos. En este caso se pueden emplear las dos medidas de flujo de las *tiles*, $Q_{HFS,c}$ y $Q_{HFS,e}$, como funciones objetivo. En la ecuación [A.9] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.10] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \\ dT_{s,e} \\ dT_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(H_1 + H_4) & \frac{H_1}{C_i} & 0 & \frac{H_4}{C_i} & 0 \\ \frac{H_1}{C_{s,c}} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_{s,e}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & -(H_2 + H_3) & 0 & 0 \\ \frac{H_4}{C_{s,e}} & 0 & 0 & -(H_4 + H_5) & \frac{H_5}{C_{s,e}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_2} & -(H_5 + H_6) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,e} \\ T_2 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} 1 \\ C_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_6}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt \quad [A.9]$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,c}^m \\ T_{s,e}^m \\ Q_{HFS,e}^m \\ Q_{HFS,e}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{A_1} & \frac{-H_5}{A_1} \\ 0 & \frac{H_2}{A_2} & \frac{-H_2}{A_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,e} \\ T_2 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \end{bmatrix} + [e] \quad [A.10]$$

A continuación se muestran los resultados del modelo y el análisis de residuos para cada una de las rutinas ensayadas.

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T _i	10	30	40	3.11E+01	2.94E-01	105.9416	0	0.0015
T _{s,c}	10	30	40	3.29E+01	1.78E-01	184.9312	0.0002	0.0026
T ₁	10	30	40	2.93E+01	3.24E-01	90.3456	-0.0001	0.0009
T _{s,e}	10	30	40	3.22E+01	9.95E-02	323.487	0.0001	0.002
T ₂	10	30	40	2.57E+01	3.58E-01	71.8298	0	0.0004
H ₁	10	100	200	8.24E+01	1.67E+00	42.9826	0.0003	0.0009
H ₄	100	300	600	3.96E+02	1.04E+00	381.0895	0.0002	0.0005
C _i	1	100	200	4.01E+01	4.19E-01	16.2283	0	0
C _{s,c}	10	500	1000	5.67E+01	3.65E-01	25.9085	0.0007	-0.0002
H ₂	0.5	3	200	2.12E+00	8.54E-02	33.423	0.0007	0
C ₁	10	500	1000	6.47E+02	5.60E+00	19.2733	0.0001	0
H ₃	0.5	3	200	2.21E+00	6.99E-02	31.6869	0	0
C _{s,e}	10	500	1500	1.07E+03	5.15E+00	34.6544	0	0.0001
H ₅	1	10	200	2.22E+01	2.02E-01	30.7472	0	0
C ₂	1000	5000	10000	6.51E+03	4.42E+01	24.5603	0	0
H ₆	1	10	200	8.23E+00	1.69E-01	22.1935	-0.0001	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	1.03E+00	5.39E-03	201.8217	-0.0006	-0.0001
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.18E+00	6.44E-03	209.4341	0	0.0084

Tabla A.25 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 5

	T_i	$T_{s,c}$	T_1	$T_{s,e}$	T_2	H_1	H_4	C_i	$C_{s,c}$	H_2	C_1	H_3	$C_{s,e}$	H_5	C_2	H_6	A_1	A_2
T_i	1																	
$T_{s,c}$	0.2	1																
T_1	-0.1	0.2	1															
$T_{s,e}$	0.4	0.4	-0.3	1														
T_2	0.0	-0.1	0.1	-0.1	1													
H_1	-0.4	-0.2	0.3	-0.2	0.1	1												
H_4	-0.3	-0.2	0.3	-0.3	0.1	0.2	1											
C_i	0.1	0.2	-0.4	0.3	-0.2	-0.3	-0.2	1										
$C_{s,c}$	-0.2	-0.2	0.4	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.3	1									
H_2	0.1	0.1	0.0	0.1	-0.1	-0.4	-0.4	0.4	-0.3	1								
C_1	0.2	0.2	-0.4	0.3	-0.2	-0.3	-0.3	0.3	-0.2	0.4	1							
H_3	0.2	0.2	-0.3	0.3	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	-0.1	0.3	1						
$C_{s,e}$	0.2	0.2	-0.4	0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0.3	-0.3	0.4	0.3	0.2	1					
H_5	-0.1	-0.1	0.2	-0.2	0.2	0.4	0.2	-0.2	0.4	-0.1	-0.5	-0.3	-0.4	1				
C_2	0.2	0.1	-0.2	0.2	-0.1	-0.2	-0.5	0.2	-0.5	0.2	0.4	0.4	0.4	-0.4	1			
H_6	-0.3	-0.1	0.3	-0.2	0.2	0.2	0.4	-0.2	0.2	-0.3	-0.2	-0.5	-0.2	0.3	-0.4	1		
A_1	0.3	0.5	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.3	0.3	-0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	-0.1	0.2	-0.2	1	
A_2	0.0	0.1	-0.3	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0.5	-0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	-0.2	0.2	-0.2	0.1	1

Tabla A.26 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina *PULSO* en el modelo 5

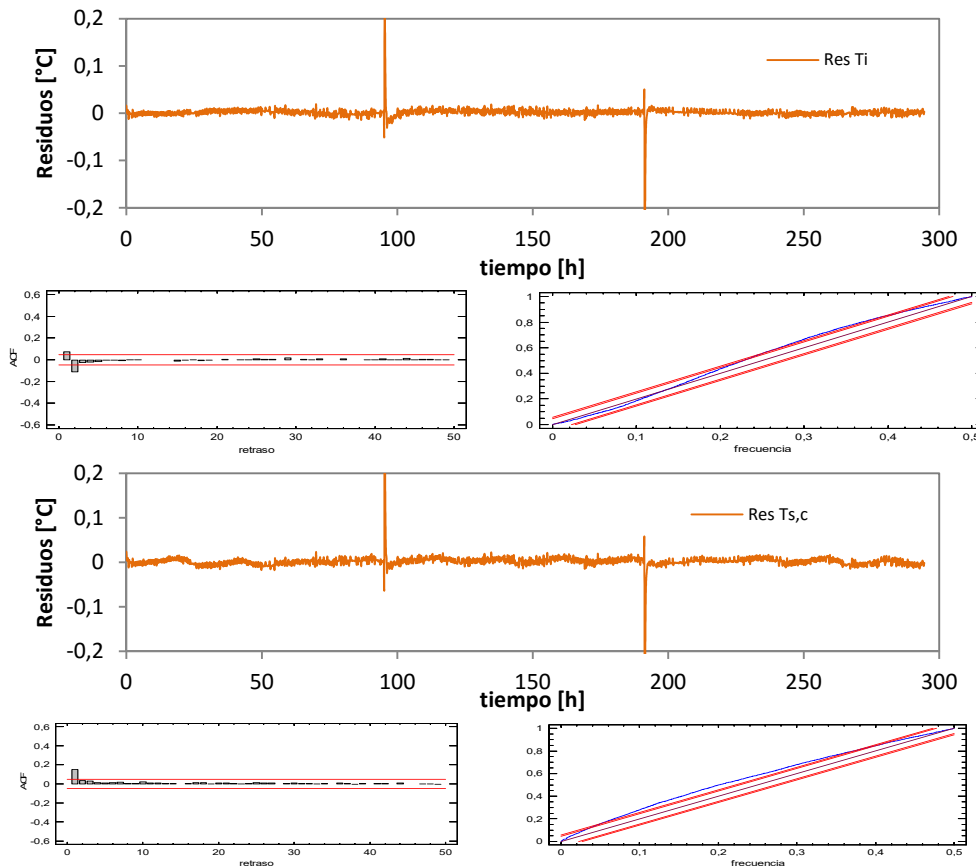


Figura A.54 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación *PULSO*

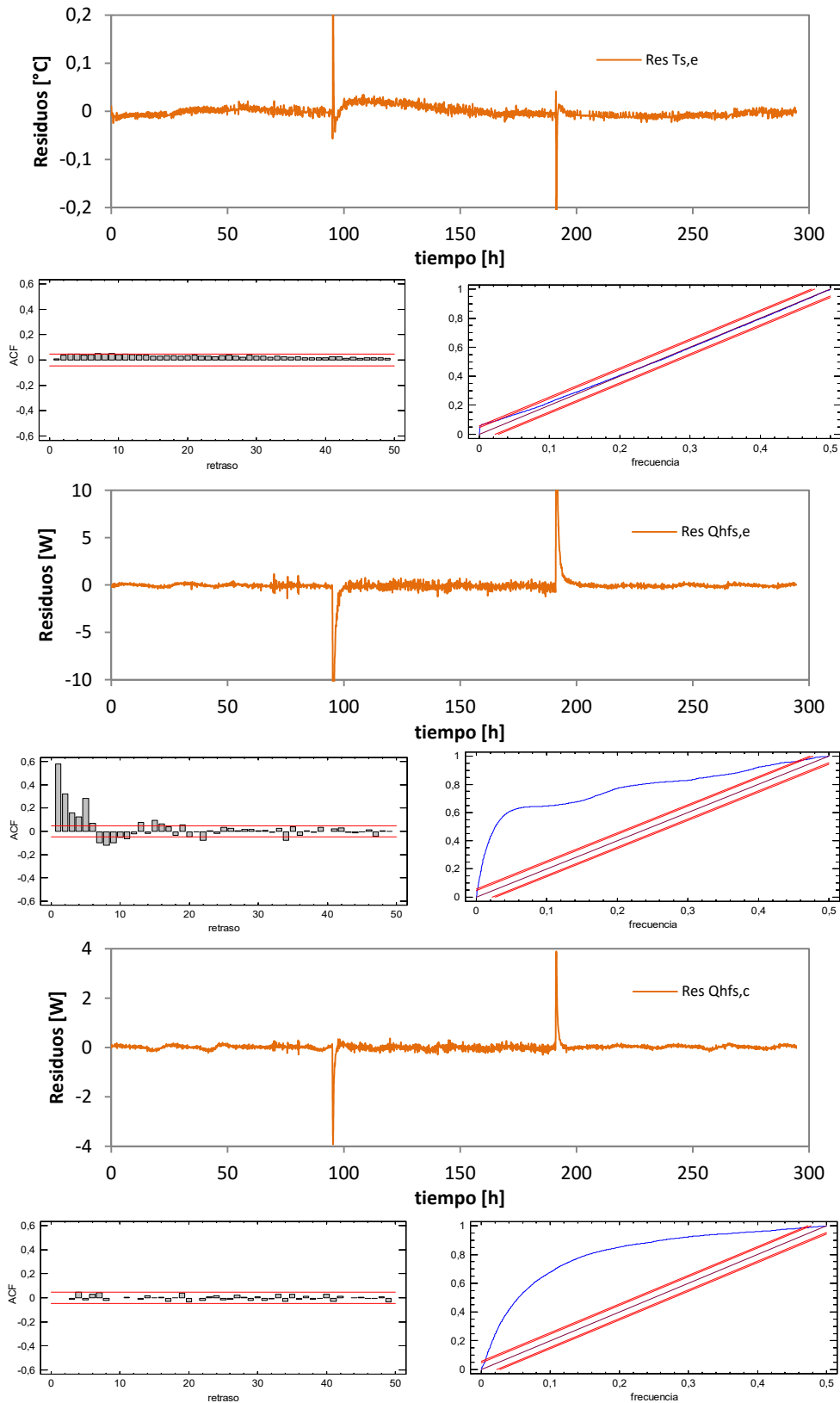


Figura A.55 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T _i	10	30	40	1.84E+01	1.94E-01	94.9206	-0.0001	-0.0002
T _{s,c}	10	30	40	1.65E+01	1.11E-01	148.2274	-0.0001	-0.0003
T ₁	10	30	40	1.68E+01	1.37E-01	123.2384	0	-0.0001
T _{s,e}	10	30	40	1.95E+01	7.51E-02	260.035	-0.0003	0
T ₂	10	30	40	1.97E+01	9.87E-02	199.4111	0.0000	0.0003
H ₁	10	100	200	8.04E+01	4.57E+00	314.7949	-0.0019	0.0002
H ₄	100	300	600	4.59E+02	1.49E+00	307.8105	0.0020	0.0014
C _i	1	100	200	1.67E+01	2.69E-01	41.7682	0.0001	0
C _{s,c}	10	500	1000	7.50E+02	1.57E+00	45.2	0	0
H ₂	0.5	3	200	9.89E+00	2.31E-01	42.7654	0.0001	0
C ₁	10	500	1000	4.88E+02	8.91E-01	91.2711	0	-0.0004
H ₃	0.5	3	200	1.16E+00	2.84E-03	212.4875	0	-0.0027
C _{s,e}	10	500	1500	1.25E+02	1.32E+00	94.9274	-0.0001	0.0004
H ₅	1	10	200	1.88E+02	2.10E+00	89.3385	-0.0002	0.0001
C ₂	1000	5000	10000	8.46E+03	2.55E+00	226.5439	0	-0.0049
H ₆	1	10	200	5.97E+00	1.59E-01	44.255	0.0001	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	9.95E-01	2.35E-03	422.557	-0.0011	0.0004
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.04E+00	1.22E-03	445.3582	-0.0001	-0.0155

Tabla A.27 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 5

	T _i	T _{s,c}	T ₁	T _{s,e}	T ₂	H ₁	H ₄	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,e}	H ₅	C ₂	H ₆	A ₁	A ₂
T _i	1																	
T _{s,c}	-0.1	1																
T ₁	0.0	0.0	1															
T _{s,e}	-0.1	-0.2	-0.1	1														
T ₂	0.0	-0.4	0.0	0.4	1													
H ₁	0.1	0.2	0.0	-0.1	-0.1	1												
H ₄	0.2	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.5	1											
C _i	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1										
C _{s,c}	0.0	-0.3	0.1	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1									
H ₂	0.1	0.0	0.2	-0.1	0.0	-0.5	0.0	0.0	0.1	1								
C ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1							
H ₃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1						
C _{s,e}	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1					
H ₅	0.0	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	0.5	0.2	0.0	0.1	-0.2	0.0	0.0	-0.1	1				
C ₂	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	-0.2	1			
H ₆	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.6	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.1	1		
A ₁	0.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	-0.3	-0.2	0.0	0.0	-0.3	0.4	-0.1	0.0	1	
A ₂	0.0	0.0	0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.2	0.1	-0.3	1

Tabla A.28 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 5

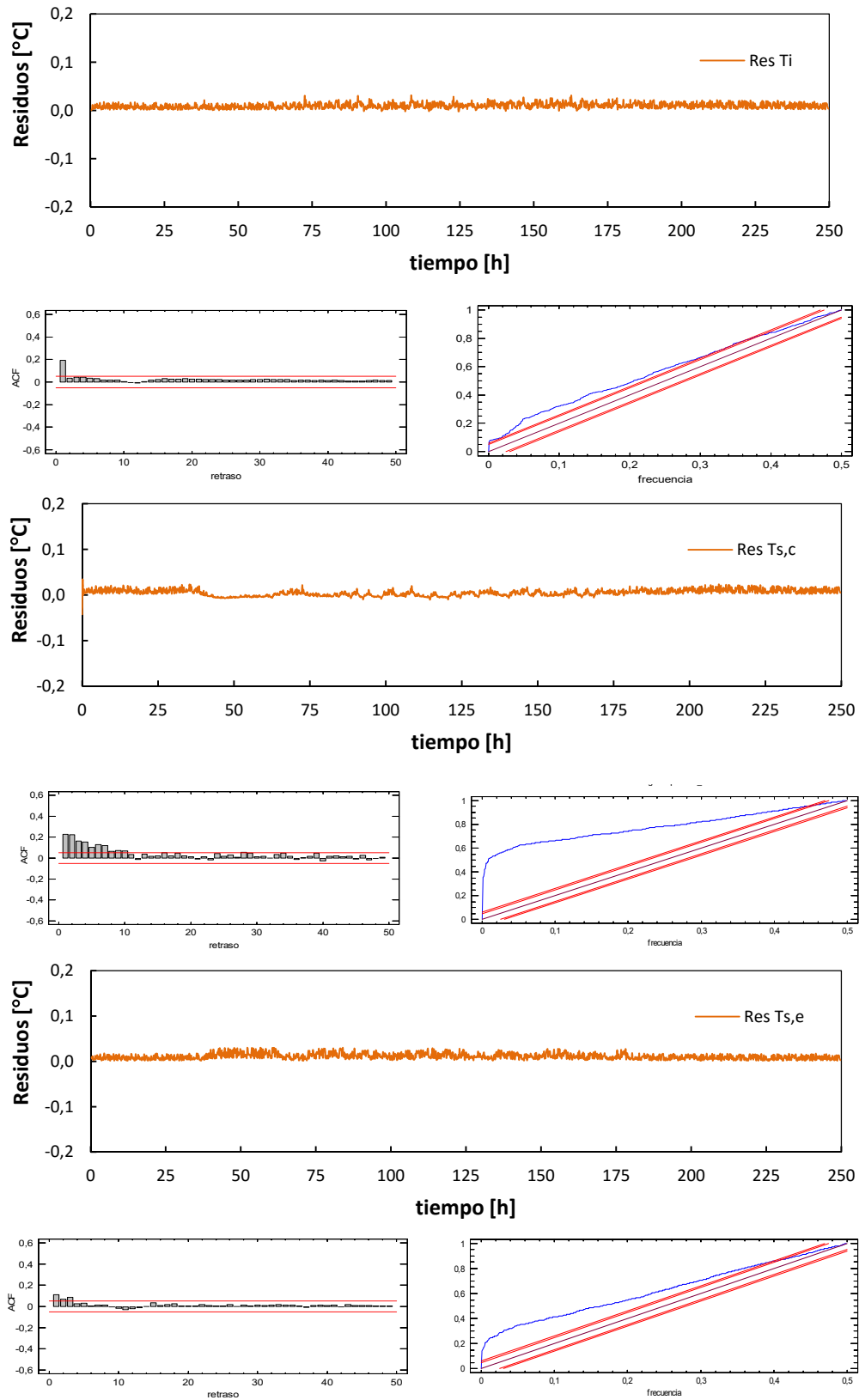


Figura A.56 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación PRBS

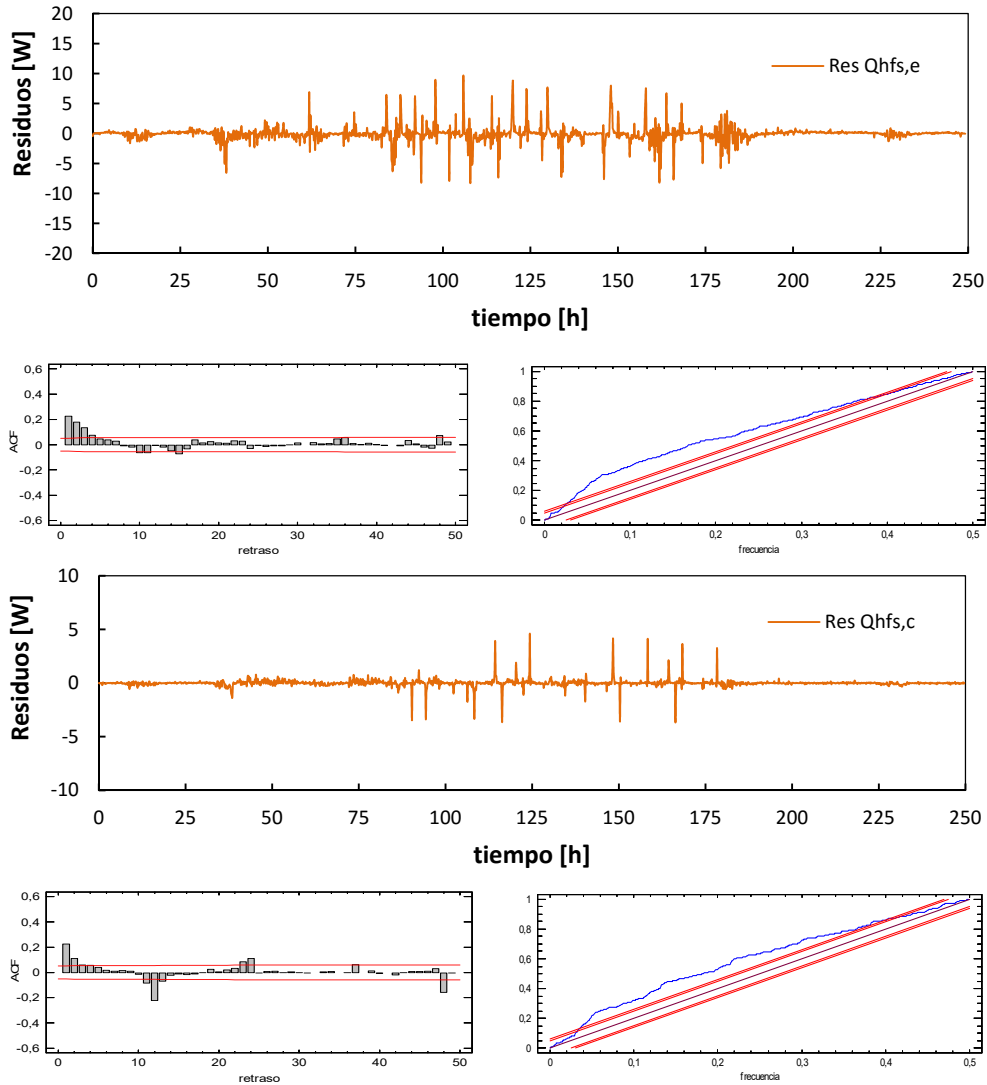


Figura A.57 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
T _i	10	30	40	2.42E+01	1.73E-02	1404.6677	0.0009	0.0001
T _{s,c}	10	30	40	2.41E+01	1.25E-02	1935.326	-0.0004	0.0003
T ₁	10	30	40	2.35E+01	4.49E-02	523.9271	0.0002	0.0016
T _{s,e}	10	30	40	2.41E+01	4.11E-03	5877.9777	0.0031	0.0003
T ₂	10	30	40	2.38E+01	1.56E-02	1522.083	-0.0009	0.0017
H ₁	10	100	200	7.20E+01	2.70E+00	26.6202	-0.0005	0
H ₄	100	300	600	3.79E+02	2.76E+00	145.9761	-0.0007	0.0006
C _i	1	100	200	4.67E+01	1.54E+00	54.1869	0.0002	0.0031
C _{s,c}	10	500	1000	4.12E+02	2.10E+00	22.7695	-0.0001	0
H ₂	0.5	3	200	1.94E+01	1.21E+00	15.955	-0.0001	0
C ₁	10	500	1000	5.58E+02	7.82E+00	13.981	0	-0.0001
H ₃	0.5	3	200	9.97E-01	1.08E-02	92.0843	-0.0125	8.3009
C _{s,e}	10	500	1500	9.60E+02	1.76E+00	64.5638	0.0003	0.0003
H ₅	1	10	200	1.54E+02	3.45E+00	44.7612	0.0003	0.0001
C ₂	1000	5000	10000	9.78E+03	1.61E+01	42.589	0.0001	-0.001
H ₆	1	10	200	5.55E+00	9.91E-02	57.3397	0	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	9.43E-01	5.85E-03	149.3222	-0.0024	0.0051
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.16E+00	3.10E-02	27.1839	0.0001	0.0031

Tabla A.29 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 5

	T _i	T _{s,c}	T ₁	T _{s,e}	T ₂	H ₁	H ₄	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,e}	H ₅	C ₂	H ₆	A ₁	A ₂
T _i	1																	
T _{s,c}	0.1	1																
T ₁	0.0	0.1	1															
T _{s,e}	0.4	0.1	0.0	1														
T ₂	0.0	0.0	0.0	0.3	1													
H ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1												
H ₄	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3	1											
C _i	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	1										
C _{s,c}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	-0.3	-0.1	1									
H ₂	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.2	-0.2	0.0	0.5	1								
C ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	-0.4	0.0	0.4	0.3	1							
H ₃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	-0.1	0.0	0.2	0.1	0.2	1						
C _{s,e}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4	0.5	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	1					
H ₅	0.0	0.0	0.1	0.0	0.4	-0.2	0.2	0.1	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.1	1				
C ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.3	-0.1	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.0	1			
H ₆	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4	0.4	0.0	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.2	0.1	0.2	1		
A ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.3	0.0	-0.3	-0.2	-0.5	-0.2	0.4	0.2	0.3	0.4	1	
A ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	-0.3	-0.1	0.3	0.2	0.5	0.2	-0.4	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3	1

Tabla A.30 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 5

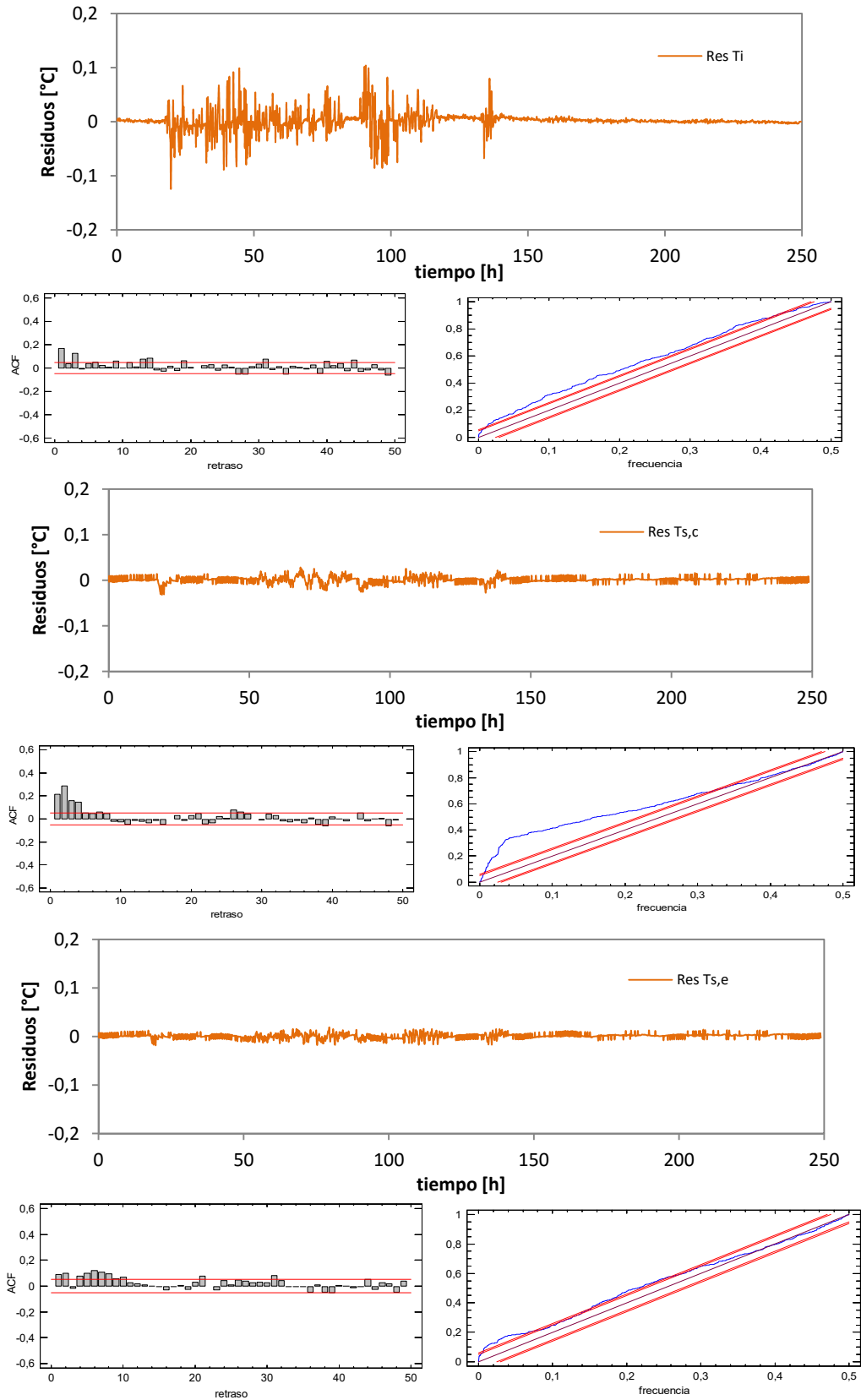


Figura A.58 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación ROLBS

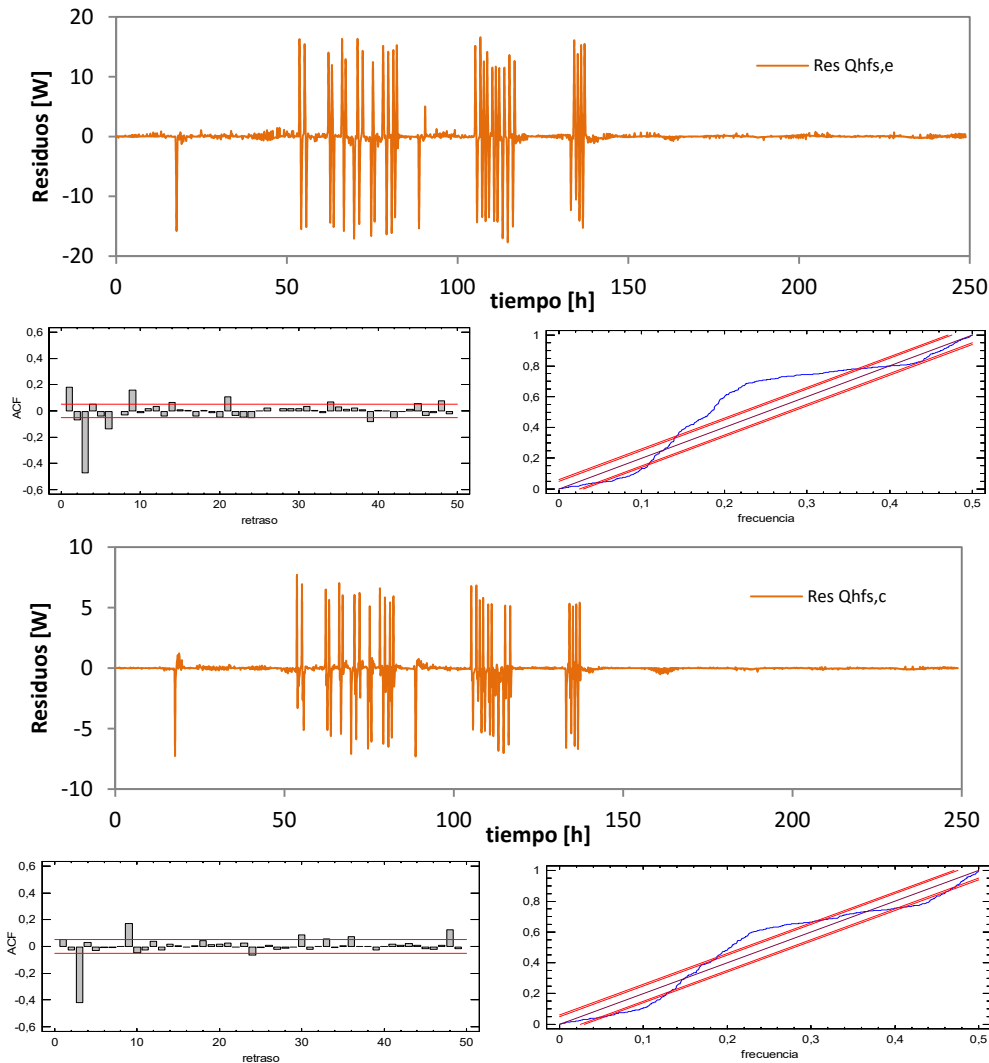


Figura A.59 – Análisis de residuos en el modelo 5 para la excitación ROLBS

A.3.1.6 Modelo 6

En el modelo 6 se define unas de las configuraciones más completa de la celda. En este caso se suma al modelo 5 el flujo intercambiado por la cara norte. En principio se espera que mejore el ajuste debido a que dicha cara presenta unas condiciones muy diferentes al resto de la envolvente. Por ejemplo, la temperatura a la que está sometida es la de la sala de servicio y no la temperatura exterior. Además dispone de la particularidad de la puerta de acceso, que aún configurada de forma que se que mantenga la geometría constructiva del resto de la envolvente de la sala de ensayos, en cuanto al espesor de aislamiento, la configuración real implica diferente comportamiento. Por otro lado, el flujo de calor neto intercambiado por dicha cara norte es residual en relación al flujo que intercambia el resto de la envolvente, por lo que puede darse el caso de que el aumento de la complejidad del modelo no compense con la mejora en los resultados de ajuste al patrón de ruido blanco respecto al modelo anterior. En la ecuación [A.11] se muestra la definición de dicho modelo con las variables de estado y las funciones de excitación. En la ecuación [A.12] se muestra la definición de las funciones objetivo.

$$\begin{bmatrix} dT_i \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \\ dT_{s,l} \\ dT_2 \\ dT_{s,n} \\ dT_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(H_1 + H_4 + H_7) & H_1 & 0 & H_4 & 0 & H_7 & 0 \\ C_i & C_i & 0 & C_i & 0 & C_i & 0 \\ H_1 & -(H_1 + H_2) & H_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{s,c} & C_{s,c} & C_{s,c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_2 & -(H_2 + H_3) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_1 & C_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_4 & 0 & 0 & -(H_2 + H_3) & H_5 & 0 & 0 \\ C_{s,l} & 0 & 0 & C_{s,l} & C_{s,l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_5 & -(H_5 + H_6) & 0 & 0 \\ C_2 & 0 & 0 & C_2 & C_2 & 0 & 0 \\ H_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(H_7 + H_8) & H_8 \\ C_{s,n} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{s,n} & C_{s,n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_8 & -(H_8 + H_9) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,l} \\ T_2 \\ T_{s,n} \\ T_3 \end{bmatrix} dt$$

[A.11]

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_6}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_9}{C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \\ T_{a,ss} \end{bmatrix} dt + [c]dt$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,c}^m \\ T_{s,e}^m \\ T_{s,n}^m \\ Q_{HFS,l}^m \\ Q_{HFS,c}^m \\ Q_{HFS,n}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{A_1} & -\frac{H_5}{A_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{A_2} & -\frac{H_2}{A_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_8}{A_3} & -\frac{H_8}{A_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_{s,l} \\ T_2 \\ T_{s,n} \\ T_3 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ T_{c,e} \\ T_e \\ T_{a,ss} \end{bmatrix} + [e]$$

[A.12]

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	10	100	200	8.61E+01	4.89E-01	1759.5962	0.0067	0.0001
H ₄	100	300	600	2.97E+02	2.43E+00	122.2374	0.0012	0.0001
H ₇	5	50	200	4.96E+01	3.60E-01	137.7578	0.0083	0
C _i	1	100	200	3.67E+01	1.14E-01	53.9298	-0.0048	0
C _{s,c}	10	500	1000	4.70E+02	3.11E-01	251.7839	0.0184	0.0016
H ₂	0.5	3	200	1.61E+00	9.48E-02	35.9708	0	0
C ₁	10	500	1500	1.05E+03	6.54E-01	267.7491	0.0125	0.0001
H ₃	0.5	3	200	2.07E+00	3.85E-02	59.4094	0	0
C _{s,l}	100	500	1000	5.13E+02	2.93E-01	221.159	0.0039	0.0001
H ₅	1	10	200	5.15E+00	4.18E-02	52.3771	-0.0009	-0.0002
C ₂	1000	5000	10000	1.46E+03	8.32E+00	174.8678	-0.0028	0.001
H ₆	1	10	500	2.70E+02	1.65E-02	42.6569	-0.0001	0
C _{s,n}	1	500	1000	2.70E+02	3.25E-01	202.4922	0.0039	0.0001
H ₈	0.1	100	500	2.72E-01	4.57E-03	59.5017	0.0001	-0.0001
C ₃	1	100	500	3.29E+02	2.48E+00	132.6191	-0.0019	0.0006
H ₉	0.1	1	100	1.41E+00	3.92E-02	35.8472	0	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	1.04E+00	3.41E-03	333.141	0.0036	0.0011
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.18E+00	9.37E-04	1575.3271	-0.0003	0.3846
A ₃	0.8	1.2	1.5	1.06E+00	1.92E-03	294.8912	0	-0.0063

Tabla A.31 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 6

	H ₁	H ₄	H ₇	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,l}	H ₅	C ₂	H ₆	C _{s,n}	H ₈	C ₃	H ₉	A ₁	A ₂	A ₃	
H ₁	1																			
H ₄	-0.3	1																		
H ₇	-0.2	0.2	1																	
C _i	0.3	-0.2	-0.3	1																
C _{s,c}	0.3	-0.3	-0.3	0.3	1															
H ₂	0.2	-0.2	-0.3	0.3	0.2	1														
C ₁	-0.2	0.3	0.3	-0.2	-0.4	-0.2	1													
H ₃	-0.3	0.4	0.2	-0.2	-0.4	-0.2	0.4	1												
C _{s,l}	-0.3	0.3	0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.2	0.2	1											
H ₅	0.2	-0.3	-0.3	0.3	0.3	0.3	-0.2	-0.5	-0.3	1										
C ₂	-0.2	0.3	0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.2	0.2	0.3	-0.3	1									
H ₆	0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.2	0.1	-0.1	1								
C _{s,n}	0.3	-0.3	-0.3	0.3	0.3	0.3	-0.2	-0.2	-0.3	0.3	-0.3	0.1	1							
H ₈	0.0	-0.5	-0.5	0.3	0.4	0.5	-0.2	-0.4	-0.2	0.2	-0.2	-0.1	0.3	1						
C ₃	-0.2	0.2	0.5	-0.4	-0.2	-0.2	0.0	0.2	0.2	-0.2	0.4	0.0	-0.2	-0.1	1					
H ₉	-0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.1	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	1				
A ₁	-0.2	0.3	0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0.3	0.3	0.2	-0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.4	0.2	0.1	1			
A ₂	0.5	-0.2	-0.4	0.5	0.2	0.2	-0.3	-0.1	-0.5	0.2	-0.4	0.0	0.2	0.2	-0.4	-0.1	-0.2	1		
A ₃	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.2	0.0	0.0	-0.2	-0.2	1	

Tabla A.32 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PULSO en el modelo 6

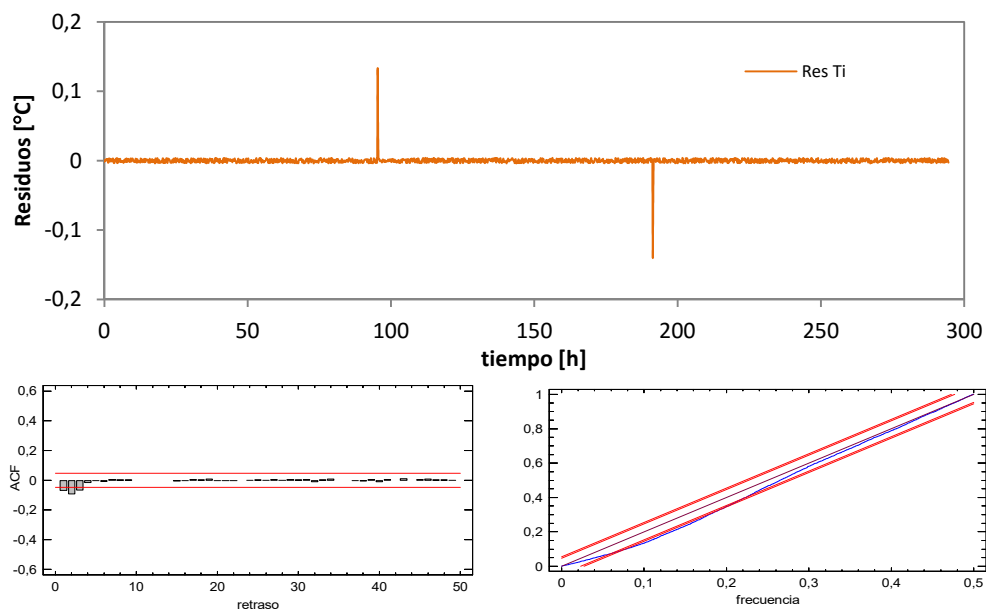


Figura A.60 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PULSO

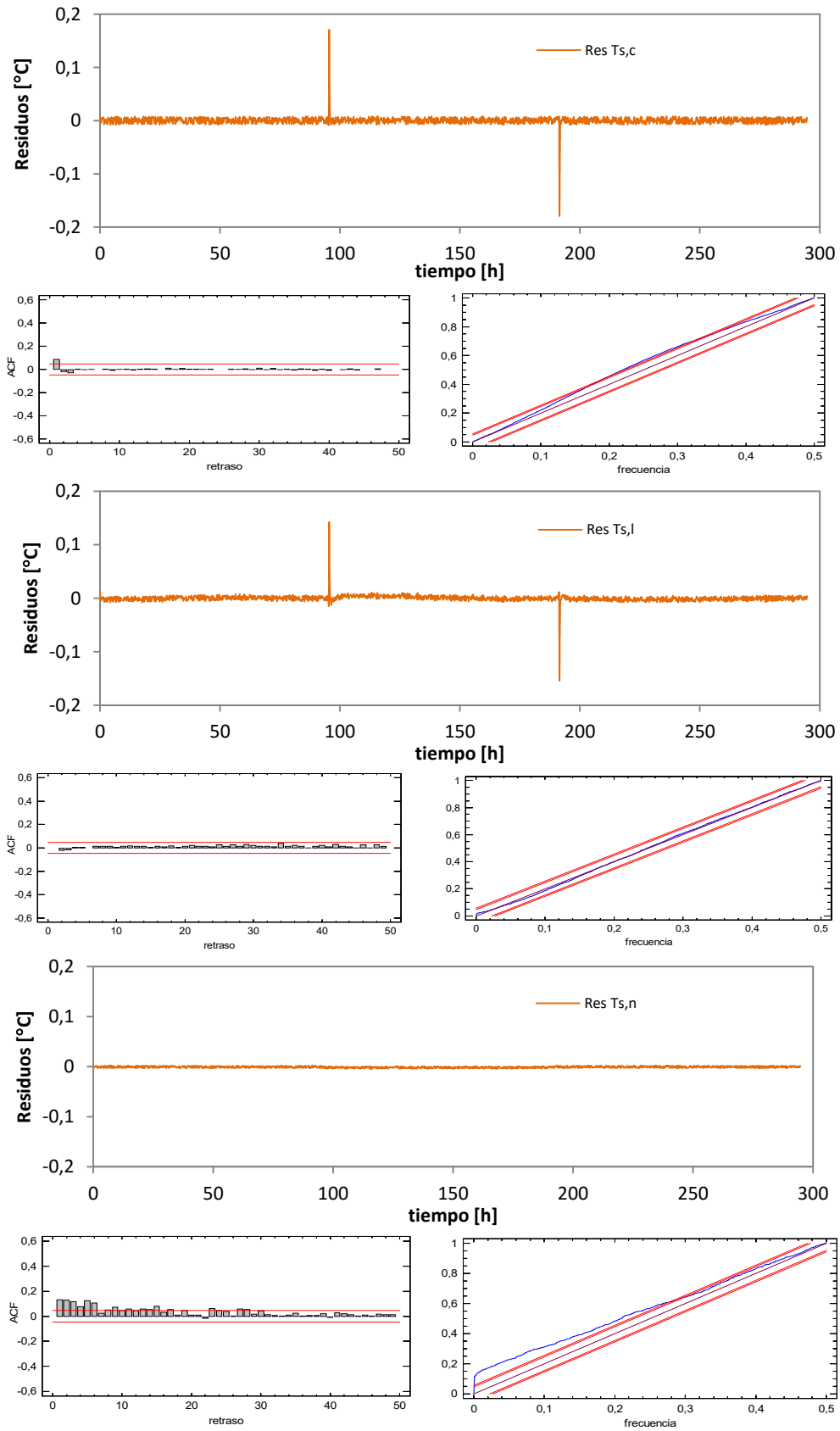


Figura A.61 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PULSO

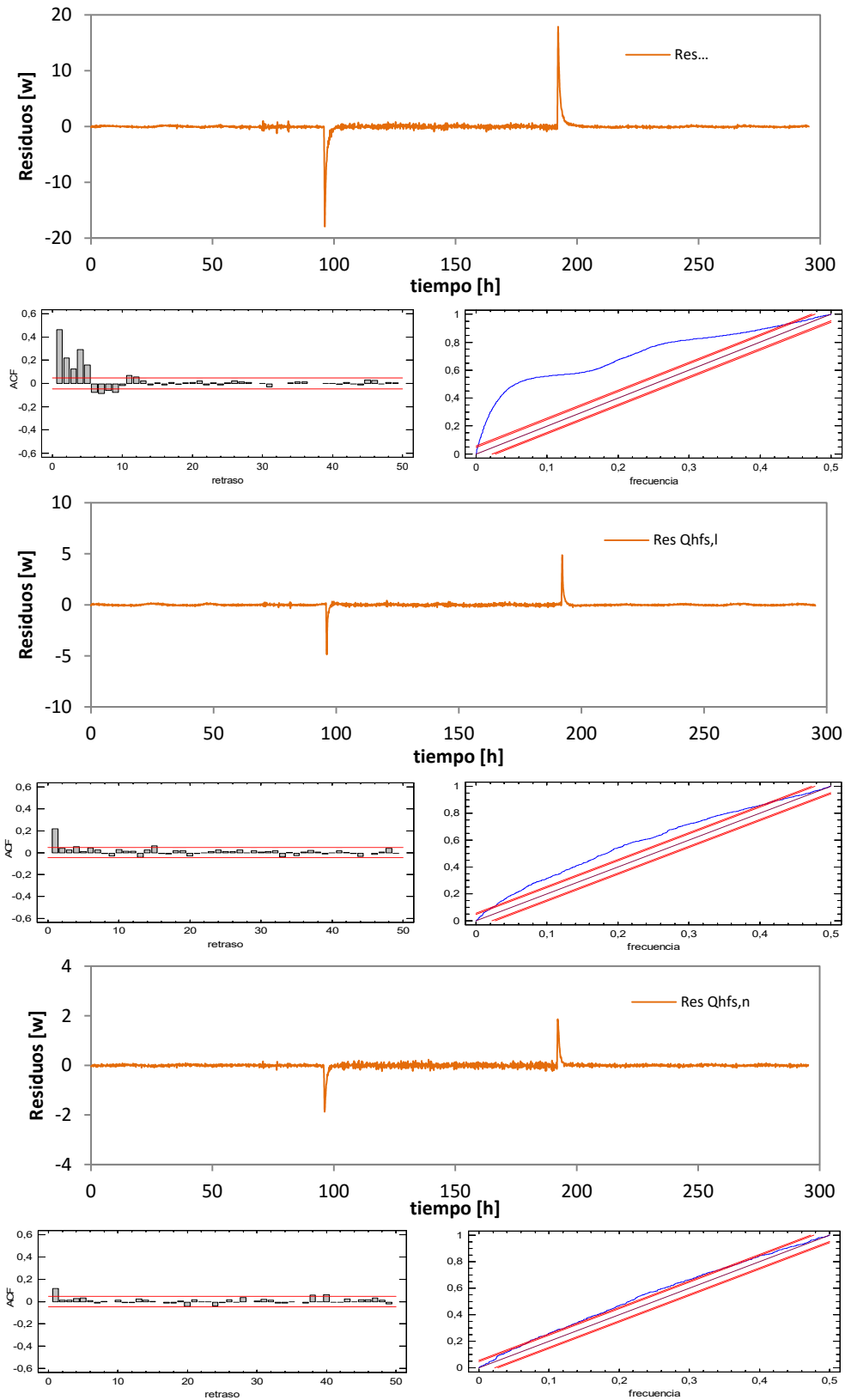


Figura A.62 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	10	100	200	8.28E+01	1.48E+00	55.8786	0	0
H ₄	100	300	600	3.32E+02	2.44E+00	135.9801	0.0001	0.0001
H ₇	5	50	200	4.27E+01	1.50E+00	28.4487	-0.0001	0
C _i	1	100	200	1.57E+02	1.91E+00	31.4328	-0.0003	0.0004
C _{s,c}	10	500	1000	2.82E+02	1.56E+00	30.1184	0	0
H ₂	0.5	3	200	2.10E+01	7.98E-01	26.2918	0	0
C ₁	10	500	1500	6.63E+02	4.80E+00	23.054	0	0
H ₃	0.5	3	200	1.10E+00	4.22E-02	25.9374	0	-0.0002
C _{s,l}	100	500	1000	6.43E+02	1.92E+00	53.8984	-0.001	0.0002
H ₅	1	10	200	1.10E+02	1.89E+00	58.4402	0	0
C ₂	1000	5000	10000	8.20E+03	1.18E+01	45.8888	0	0
H ₆	1	10	500	4.51E+00	9.08E-02	49.6415	0	0
C _{s,n}	1	500	1000	2.97E+02	7.05E-01	25.0352	0	0
H ₈	0.1	100	500	1.44E+01	5.45E-01	26.3583	0	0
C ₃	1	100	500	5.04E+02	2.03E+00	24.7778	0	0
H ₉	0.1	1	100	7.26E-01	2.64E-02	27.5439	0	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	1.08E+00	6.25E-03	146.485	-0.0001	0.0113
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.14E+00	1.50E-02	66.415	0.0001	7.3191
A ₃	0.8	1.2	1.5	1.04E+00	3.46E-02	28.7434	0	2.2057

Tabla A.33 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 6

	H ₁	H ₄	H ₇	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,l}	H ₅	C ₂	H ₆	C _{s,n}	H ₈	C ₃	H ₉	A ₁	A ₂	A ₃
H ₁	1																		
H ₄	-0.2	1																	
H ₇	0.0	-0.2	1																
C _i	0.1	-0.3	-0.2	1															
C _{s,c}	0.2	-0.4	0.0	0.0	1														
H ₂	0.3	-0.2	0.0	0.1	0.1	1													
C ₁	0.3	-0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	1												
H ₃	0.3	-0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	1											
C _{s,l}	-0.3	0.2	-0.1	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	1										
H ₅	-0.2	0.3	-0.3	0.1	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	0.1	1									
C ₂	-0.2	0.3	-0.2	0.0	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.1	-0.1	1								
H ₆	-0.2	0.3	-0.2	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	1							
C _{s,n}	0.0	-0.4	0.3	-0.4	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.2	-0.3	-0.2	-0.2	1						
H ₈	0.0	-0.2	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.3	1					
C ₃	0.0	-0.5	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.3	0.3	1				
H ₉	0.0	-0.2	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2	0.3	0.3	0.3	1			
A ₁	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	1		
A ₂	0.3	-0.2	0.0	0.1	0.5	0.4	0.4	0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.2	1	
A ₃	0.0	-0.2	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	-0.2	0.0	1

Tabla A.34 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina PRBS en el modelo 6

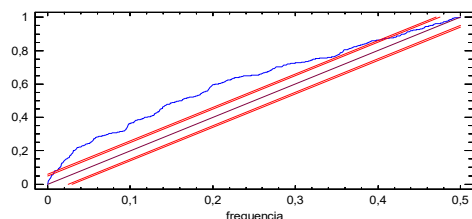
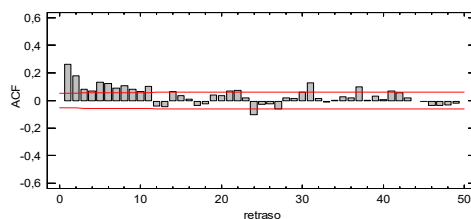
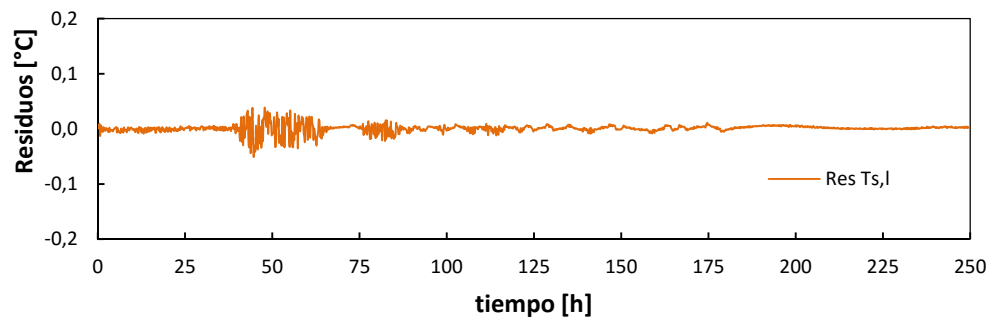
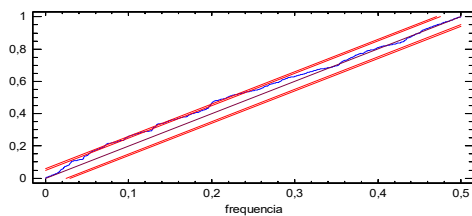
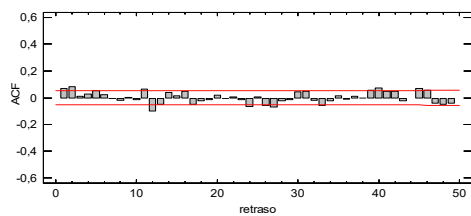
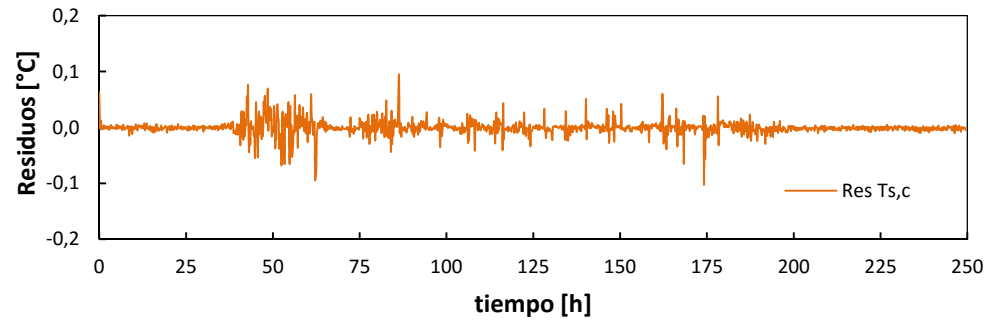
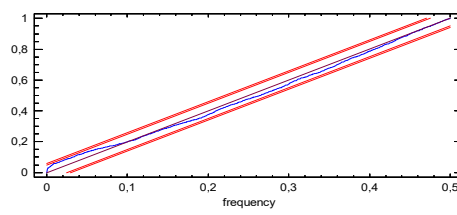
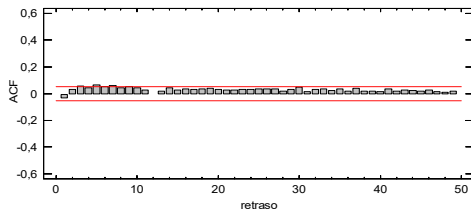
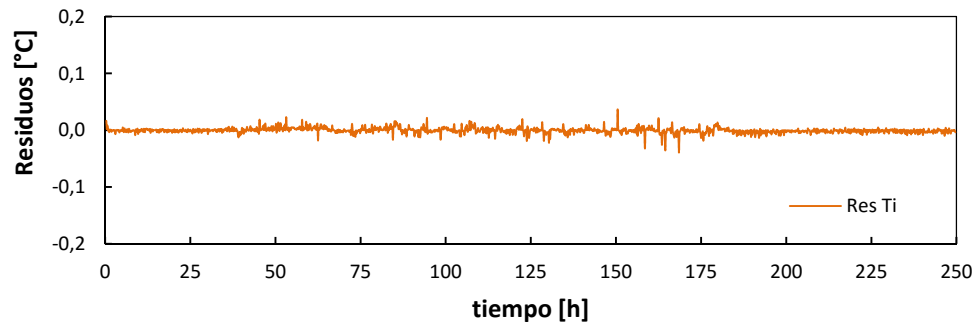


Figura A.63 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

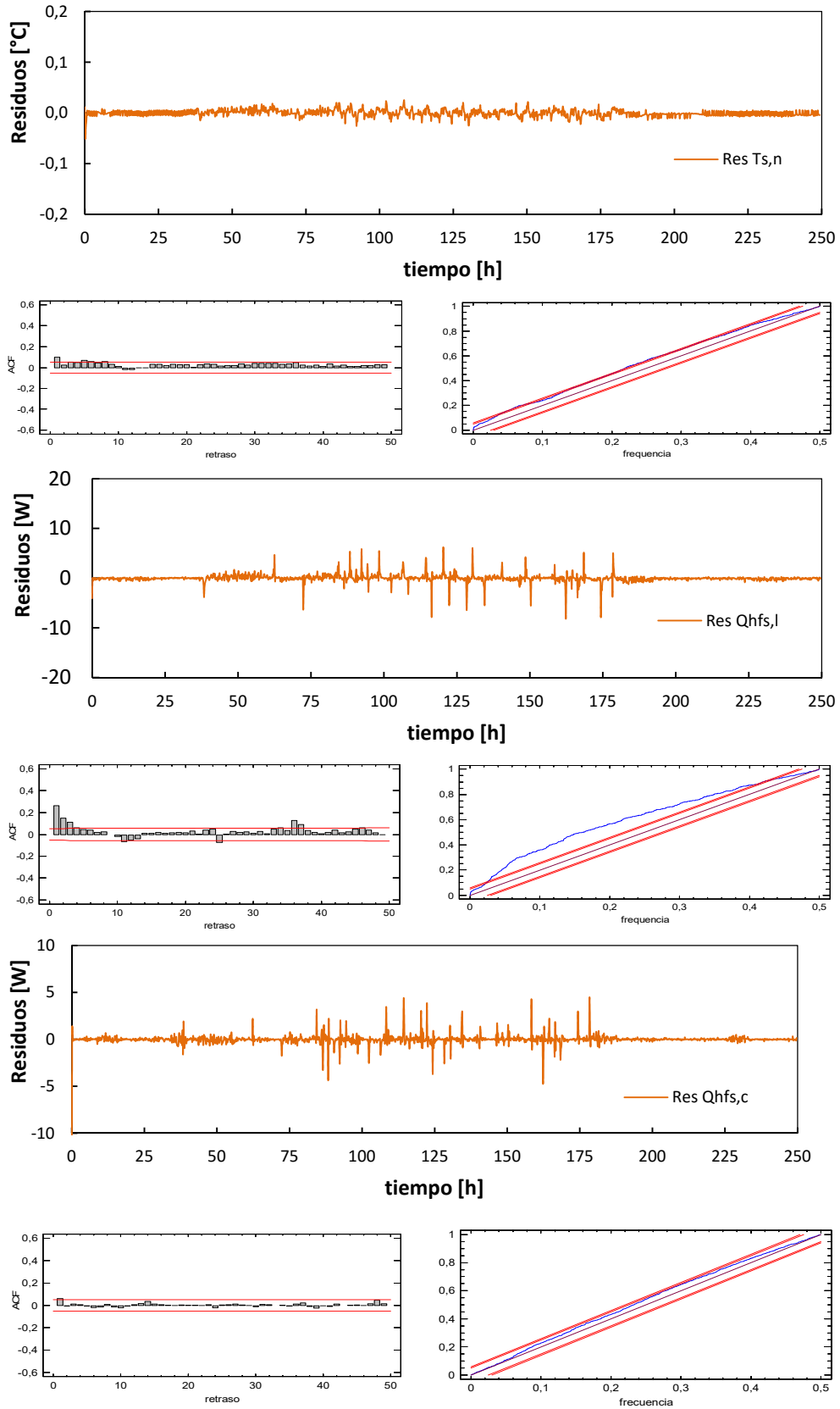


Figura A.64 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

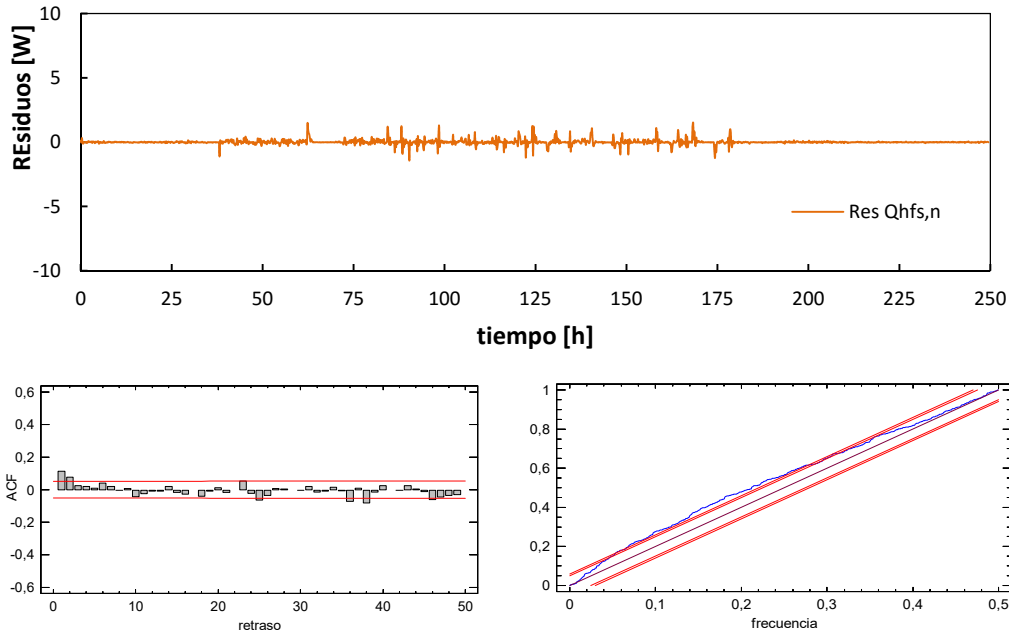


Figura A.65 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	10	100	200	6.22E+01	2.71E+00	1554.0032	-0.0030	0.0034
H ₄	100	300	600	2.61E+02	5.60E-01	453.1604	-0.0003	0
H ₇	5	50	200	5.00E+01	6.74E-02	741.9822	-0.0019	0
C _i	1	100	200	4.33E+01	6.82E-02	384.058	0.0003	0
C _{s,c}	10	500	1000	3.22E+02	1.31E-01	2212.9337	-0.0077	0.0776
H ₂	0.5	3	200	1.71E+01	8.26E-02	207.2765	0.0002	0
C ₁	10	500	1500	4.33E+02	3.23E-01	396.9656	-0.0009	0
H ₃	0.5	3	200	9.82E-01	1.13E-02	105.1034	0	-0.0001
C _{s,l}	100	500	1000	5.25E+02	2.89E-02	3839.7743	-0.0030	0.0003
H ₅	1	10	200	1.50E+02	4.91E-01	305.6297	-0.0009	0.0001
C ₂	1000	5000	10000	8.33E+03	1.19E+00	516.2195	-0.0013	0.0001
H ₆	1	10	500	4.78E+00	7.16E-02	66.7905	0	0
C _{s,n}	1	500	1000	3.03E+02	1.06E-01	429.3755	-0.0004	0
H ₈	0.1	100	500	1.74E+01	1.38E-01	125.5773	-0.0002	0
C ₃	1	100	500	6.15E+02	1.58E+00	38.9058	-0.0005	0
H ₉	0.1	1	100	1.27E+00	1.33E-02	62.2658	0.0001	0
A ₁	0.8	1.2	1.5	9.38E-01	3.18E-03	294.9435	-0.0005	-0.0002
A ₂	0.8	1.2	1.5	1.10E+00	8.12E-03	118.6874	0.0001	0.0001
A ₃	0.8	1.2	1.5	1.08E+00	3.96E-03	273.5802	0.0001	0.0025

Tabla A.35 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 6

	H ₁	H ₄	H ₇	C _i	C _{s,c}	H ₂	C ₁	H ₃	C _{s,l}	H ₅	C ₂	H ₆	C _{s,n}	H ₈	C ₃	H ₉	A ₁	A ₂	A ₃	
H ₁	1																			
H ₄	0.2	1																		
H ₇	-0.4	-0.5	1																	
C _i	-0.4	-0.4	0.2	1																
C _{s,c}	0.4	0.3	0.1	-0.3	1															
H ₂	-0.1	-0.2	0.2	0.1	0.2	1														
C ₁	0.2	0.2	-0.4	-0.3	0.3	-0.4	1													
H ₃	-0.2	0.3	-0.2	0.1	-0.3	-0.3	0.0	1												
C _{s,l}	0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.3	0.4	0.2	1											
H ₅	0.2	0.2	-0.3	-0.3	0.3	-0.4	0.3	0.0	0.4	1										
C ₂	-0.5	-0.2	0.4	0.2	-0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	1									
H ₆	0.2	0.4	-0.2	-0.2	0.2	0.0	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	1								
C _{s,n}	-0.2	-0.2	0.4	0.2	-0.2	0.2	-0.2	0.0	-0.5	-0.3	0.2	-0.2	1							
H ₈	-0.2	-0.1	0.2	-0.4	0.2	0.3	0.2	-0.2	-0.2	0.3	-0.2	0.3	0.0	1						
C ₃	0.2	0.2	-0.2	-0.3	0.3	-0.2	0.3	-0.1	0.3	0.3	-0.3	0.2	-0.3	0.4	1					
H ₉	0.0	0.2	-0.4	-0.2	0.3	-0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	-0.4	0.2	-0.2	-0.1	0.3	1				
A ₁	-0.1	0.2	-0.3	0.2	-0.2	-0.4	-0.4	0.3	0.4	-0.4	0.2	-0.4	0.3	-0.2	-0.2	0.0	1			
A ₂	-0.4	-0.4	-0.1	0.2	-0.2	0.0	-0.2	0.3	-0.1	-0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.4	-0.2	-0.1	0.4	1		
A ₃	0.0	0.0	0.1	-0.2	0.2	0.1	0.2	-0.1	-0.1	0.2	-0.1	0.1	-0.2	0.2	0.2	0.1	-0.1	-0.1	1	

Tabla A.36 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros para la rutina ROLBS en el modelo 6

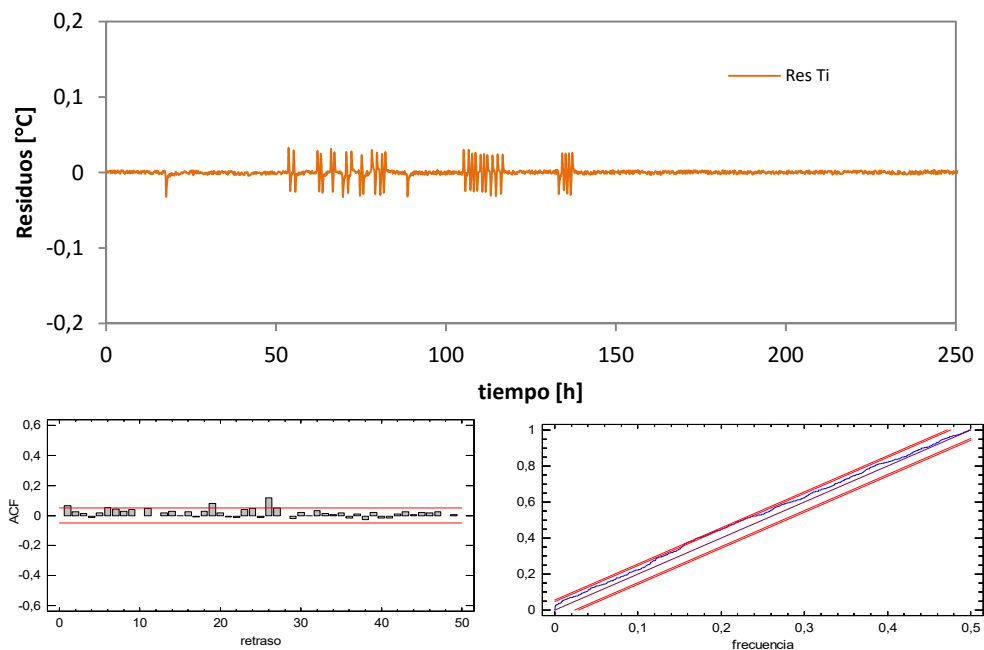


Figura A.66 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación ROLBS

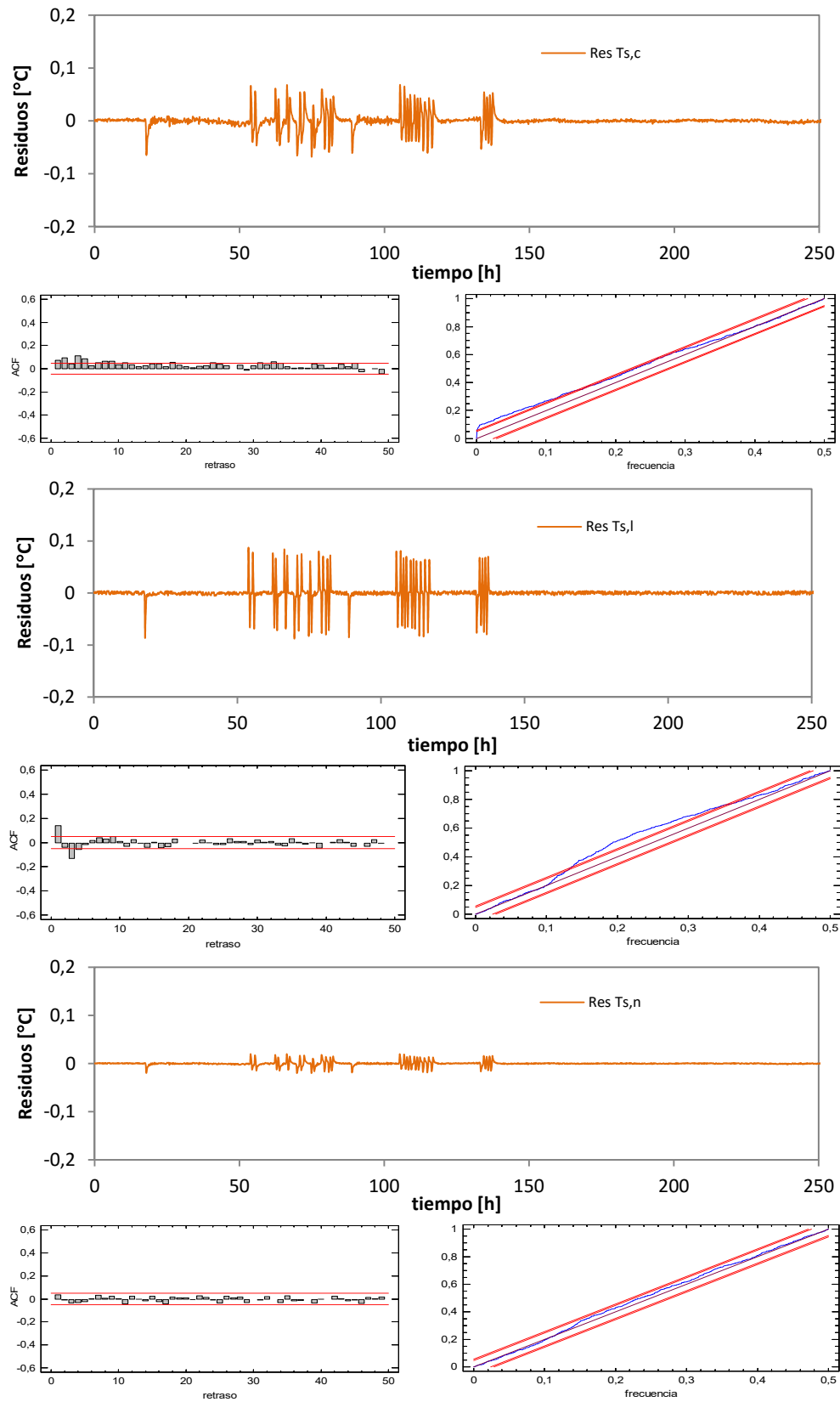


Figura A.67 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación ROLBS

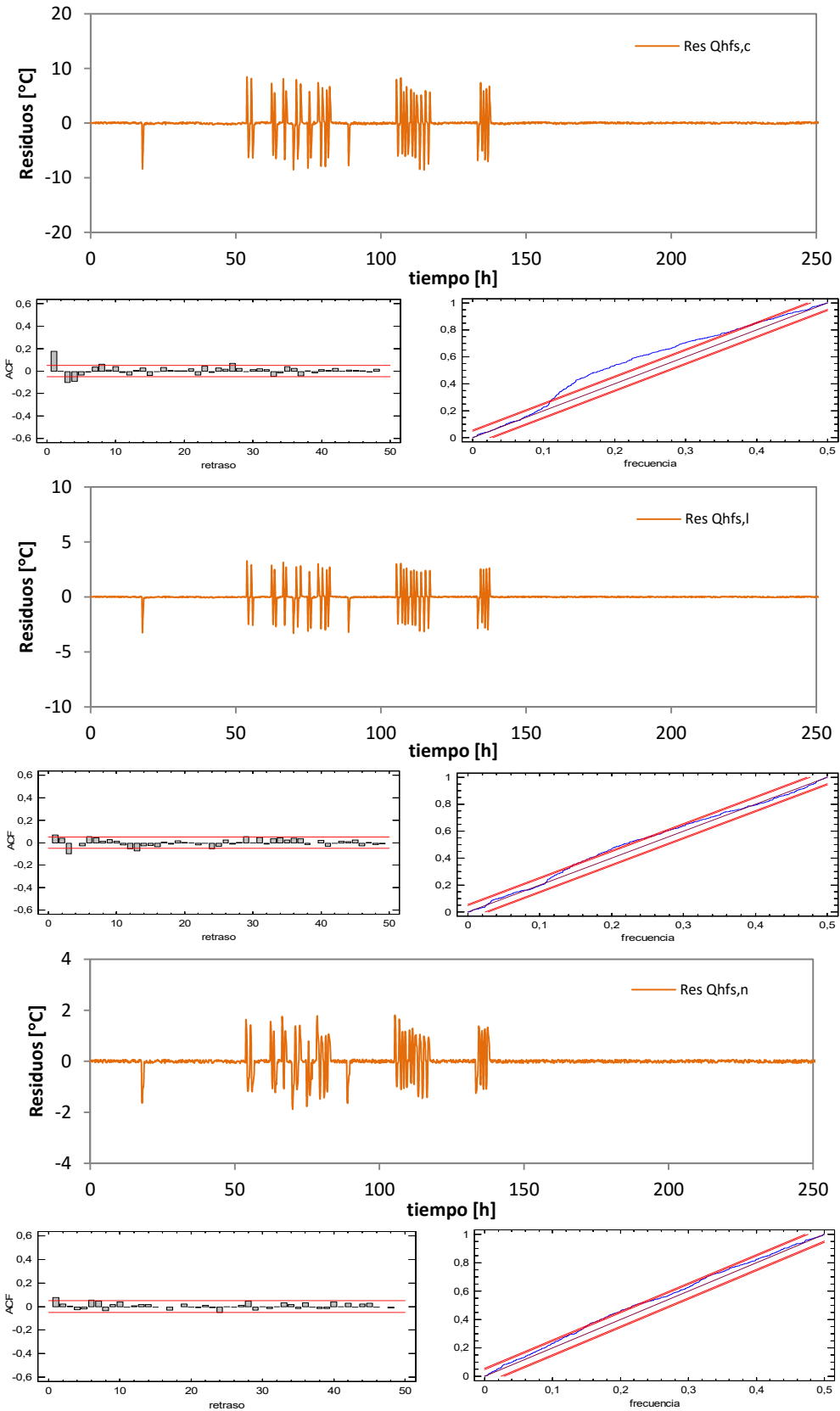


Figura A.67 – Análisis de residuos en el modelo 6 para la excitación ROLBS

A.3.2 Modelo del muro de calibración

A.3.1.1 Flujo unidimensional

Resultados de los modelos de identificación de parámetros para la determinación del modelo óptimo unidimensional del muro de calibración para la rutina ROLBS. Con el análisis de una rutina es suficiente para el proceso de optimización. En la Figura A.68 se muestra el modelo genérico que se emplea en el estudio, donde el subíndice N corresponde al orden del modelo.

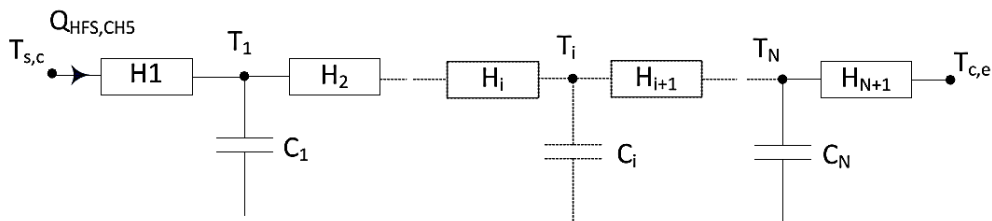


Figura A.68– Modelo unidimensional para la zona central del muro de calibración

A continuación se recogen los resultados del proceso de identificación de parámetros para cada orden de modelo. Como datos de alimentación al modelo se emplea los registrados durante la rutina *ROLBS*, ya que se trata de la rutina que exige mayor orden de modelo debido a su alta frecuencia. De forma que si se optimiza el modelo para dicha rutina se optimiza también para el resto de rutinas de ensayo.

Modelo 1º orden

En las ecuaciones [A.13] y [A.14] se recoge la definición del modelo y la función objetivo, que en este caso se reduce únicamente al flujo central medido por el grupo CH5 de *tiles*. Posteriormente se muestran los resultados junto con el análisis de residuos.

$$[dT_1] = \left[\frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} \right] [T_1] dt + \left[\frac{H_1}{C_1} \quad \frac{H_2}{C_1} \right] \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma_1] dW \quad [A.13]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [H_1][T_1(t)] + [H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [s_{CH5}] de(t) \quad [A.14]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	0.2	10	50	7.71E+00	7.21E-01	107.02	0	0
H_2	0.2	10	50	2.18E-03	2.03E-01	10.621	0	-0.0172
C_1	10	200	500	1.30E+02	1.99E+00	31.098	0	0.0008

Tabla A.37 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 1

	H_1	H_2	C_1
H_1	1		
H_2	-0.098	1	
C_1	0.133	0.040	1

Tabla A.38 – Coeficientes de correlación de las variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 1

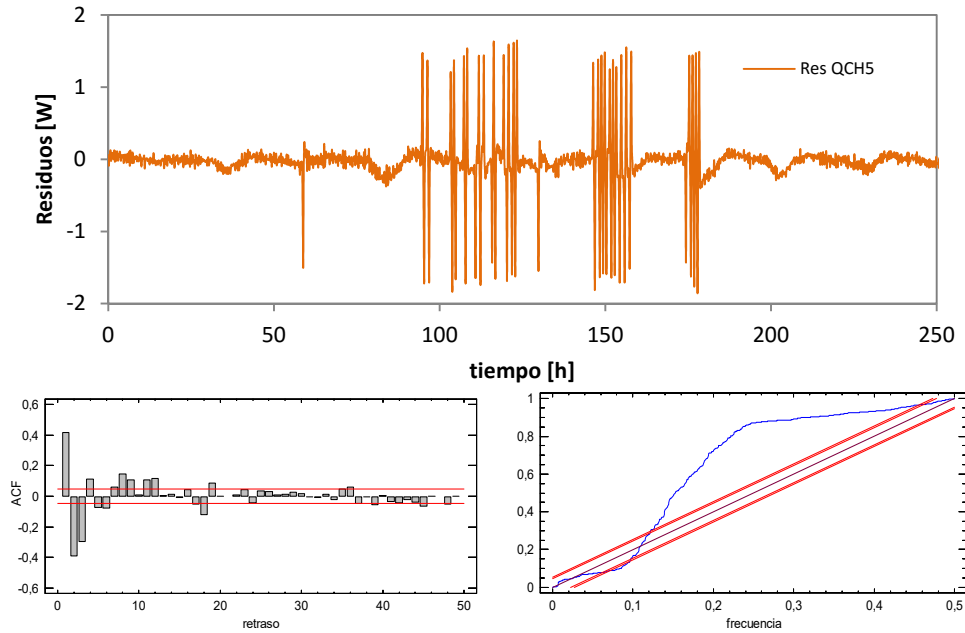


Figura A.69– Análisis del modelo unidimensional de orden 1 para el flujo central del muro de calibración

El proceso de identificación se obtiene sin introducir el error de las variables de entrada, $T_{s,c}$ y $T_{c,e}$ y el error de la función objetivo, $Q_{HFS,CH5}$. Como la herramienta empleada es el CTSM, en este caso, la forma de anular el componente de error de la función entrada es imponiendo un valor de $s_{CH5} = 0$. De esta forma se obtiene la incertidumbre del proceso de identificación de parámetros para la transmitancia total y para la capacidad térmica. En el caso de transmitancia H , ecuación [A.15], se obtiene de aplicar la expresión correspondiente a la propagación de incertidumbres de los valores de H_1 y H_2 del modelo, ecuación [A.16], junto con los errores del proceso de ajuste que se pueden tomar del resultado de la desviación estándar indicada en la Tabla A.37.

$$H = \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \quad [A.15]$$

$$u_{H_mod} = \left[\left(\frac{\partial H}{\partial H_1} \right)^2 u^2(H_1) + \left(\frac{\partial H}{\partial H_2} \right)^2 u^2(H_2) \right]^{1/2} \quad [A.16]$$

En el caso de la capacidad térmica, la incertidumbre se obtiene directamente del resultado del modelo. Y para modelos de orden mayor, se obtiene directamente como media geométrica de las incertidumbres de cada capacidad térmica individual. Los

resultados finales que se obtienen se muestran en la Tabla A.39, hay que tener en cuenta que los valores de capacidad térmica en el modelo están en unidades de [W10min/K] y las unidades de trabajo son en [MJ/K].

	valor	u [%]
H [W/K]	0.212	1.2
C [MJ/K]	0.078	1.5

Tabla A.39 – Resultados finales transmitancia y capacidad térmica junto con la incertidumbre del modelo de identificación de parámetros

Para determinar la incertidumbre final del resultado es necesario tener en cuenta el error de medida de las propias variables de entrada y de la función objetivo. Para ello, se introduce el error de cada variable en el modelo y se calcula el efecto en cada uno de los parámetros y en el resultado final, es decir, se determina un dU y dC asociado a cada error de medida de cada variable mencionada que participa del modelo. Los valores de dU y dC se obtiene como diferencia entre la transmitancia resultado respecto a la transmitancia base obtenida sin error en las variables medidas. Aplicando este proceso se obtienen los resultados de la Tabla A.40.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
$T_{s,c}$	0.2	K	0.002	0.001
$T_{c,e}$	0.5	K	0.004	0.001
Q_{CH5}	0.1	W	0.006	0.004

Tabla A.40 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación

De igual forma, si se considera la incertidumbre de propagación de los errores de calibración de las variables de medida a los resultados del modelo como la raíz de la suma de cuadrados se obtienen los resultados indicados en la Tabla A.41.

	u [%]
H [W/K]	3.2
C [MJ/K]	1.9

Tabla A.41 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación

Por último, se toma como incertidumbre total la combinación de la incertidumbre del modelo y la incertidumbre propagada del error de las variables de medida se obtiene el resultados final mostrado en la Tabla A.42.

	u [%]
H [W/K]	3.4
C [MJ/K]	2.4

Tabla A.42 – Incertidumbre final de la transmitancia y la capacidad térmica de la zona con flujo unidimensional del muro de calibración

Este mismo proceso se aplica el resto de modelos de orden creciente con el que se analiza el comportamiento de la zona unidimensional del muro de calibración, que se muestra a continuación.

Modelo 2º orden

En las ecuaciones [A.17] y [A.18] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 2, y en la Tabla A.43 los resultados del modelo y en la Tabla A.44 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dW \quad [\text{A.17}]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \end{bmatrix} + [H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [s_{CH5}]de(t) \quad [\text{A.18}]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	50	100	2.36E+00	7.62E-02	15.783	0	0
H ₂	0.2	50	100	1.12E+00	3.74E-02	15.3	0	0
C ₁	10	100	500	2.77E+01	5.22E-01	15.365	0	0
C ₂	10	100	500	1.04E+02	1.90E+00	15.866	0	0.0001
H ₃	0.2	50	100	3.08E-01	1.00E-02	15.703	0	0

Tabla A.43 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 2

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	0.184	1			
C ₁	0.195	0.185	1		
C ₂	0.195	0.188	0.186	1	
H ₃	0.195	0.178	0.187	0.196	1

Tabla A.44 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 2

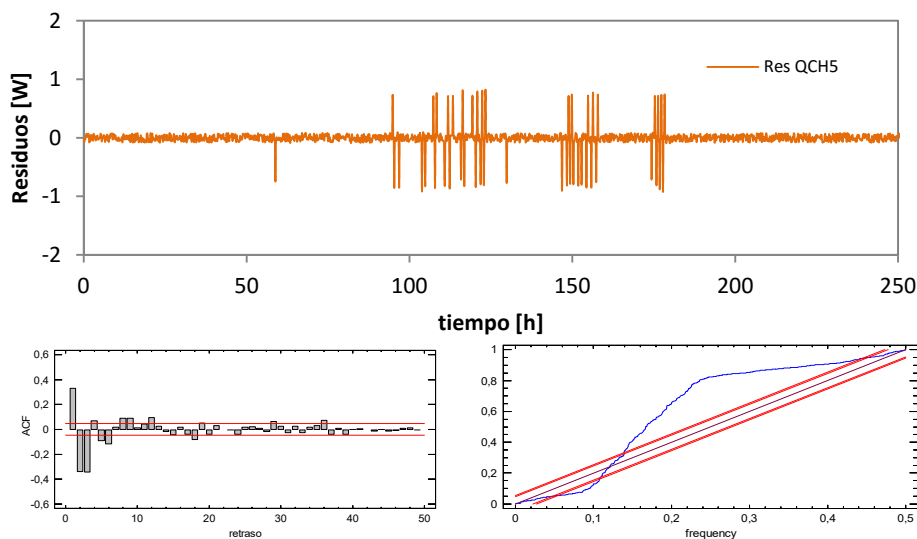


Figura A.70– Análisis del modelo unidimensional de orden 2 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.45 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
T _{s,c}	0.2	K	0.003	0.001
T _{c,e}	0.5	K	0.005	0.001
Q _{CH5}	0.1	W	0.011	0.002

Tabla A.45 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 2

Modelo 3º orden

En las ecuaciones [A.19] y [A.20] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 3, y en la Tabla A.46 los resultados del modelo y en la Tabla A.47 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{H_4}{C_3} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dW \quad \text{[A.19]}$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \end{bmatrix} + [H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [s_{CH5}]de(t) \quad \text{[A.20]}$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	50	100	7.82E-01	1.39E-02	21.439	0	0
H ₂	0.2	50	100	2.93E-01	5.78E-03	19.263	0	-0.0001
C ₁	10	100	500	1.30E+01	5.28E-02	19.312	0	0
C ₂	10	100	500	1.51E+01	3.00E-01	3.933	0	0
H ₃	0.2	50	100	8.26E+00	8.78E-01	3.582	0	0
C ₃	10	100	500	9.78E+01	9.11E-01	8.39	0	0.0014
H ₄	0.2	50	100	5.06E+01	1.00E+00	19.267	0	0.0701

Tabla A.46 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 3

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄
H ₁	1						
H ₂	0.306	1					
C ₁	0.301	0.292	1				
C ₂	-0.031	-0.174	-0.055	1			
H ₃	-0.006	-0.176	-0.013	0.303	1		
C ₃	-0.102	-0.126	-0.136	0.013	0.217	1	
H ₄	-0.083	-0.106	-0.074	0.171	0.129	0.401	1

Tabla A.47 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 3

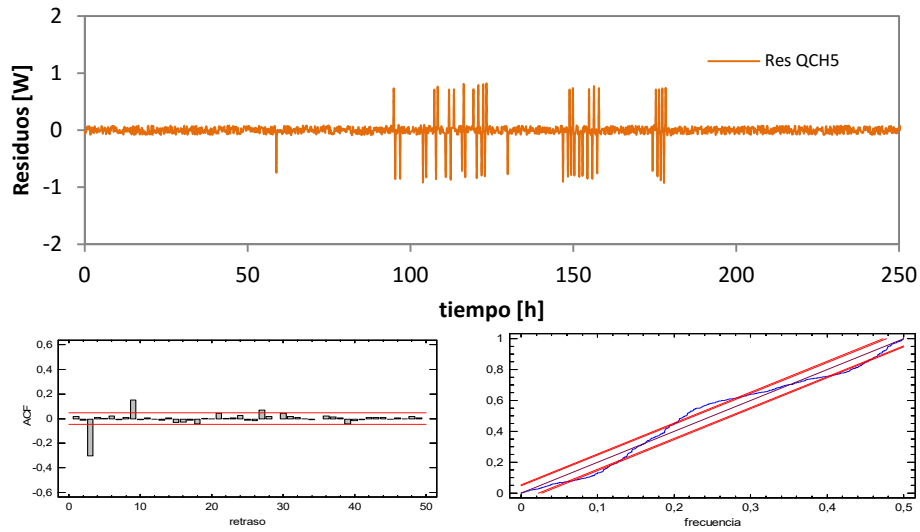


Figura A.71– Análisis del modelo unidimensional de orden 3 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.48 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
$T_{s,c}$	0.2	K	0.001	0.001
$T_{c,e}$	0.5	K	0.002	0.001
Q_{CH5}	0.1	W	0.004	0.001

Tabla A.48 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 3

Modelo 4º orden

En las ecuaciones [A.21] y [A.22] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 4, y en la Tabla A.49 los resultados del modelo y en la Tabla A.50 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dW \quad [A.21]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \end{bmatrix} + [H_1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [s_{CH5}]de(t) \quad [A.22]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	50	200	7.66E-01	7.80E-03	252.05	0	-0.0001
H ₂	0.2	50	200	2.93E-01	3.44E-03	218.35	0	-0.002
C ₁	1	100	500	1.48E+01	4.06E-02	222.73	0	0
C ₂	1	100	500	9.70E+00	1.57E-01	37.67	0	0
H ₃	0.2	50	200	7.09E+00	4.82E-01	37.72	0	0
C ₃	1	100	500	2.45E+01	5.54E-01	26.9	0	0.0001
H ₄	0.2	50	200	2.54E+01	3.13E+00	20.85	0	0
C ₄	1	100	500	7.80E+01	3.32E-01	143.08	0	0.0395
H ₅	0.2	50	200	5.63E+01	9.84E-01	146.81	0	0.07

Tabla A.49 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 4

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅
H ₁	1								
H ₂	0.294	1							
C ₁	0.288	0.274	1						
C ₂	-0.120	-0.262	-0.098	1					
H ₃	0.158	-0.064	0.155	0.210	1				
C ₃	-0.318	-0.346	-0.275	0.392	-0.007	1			
H ₄	-0.328	-0.368	-0.265	0.197	0.001	0.293	1		
C ₄	0.123	0.089	0.097	-0.094	0.104	-0.231	-0.173	1	
H ₅	-0.367	-0.326	-0.289	0.343	-0.124	0.201	0.195	-0.078	1

Tabla A.50 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 4

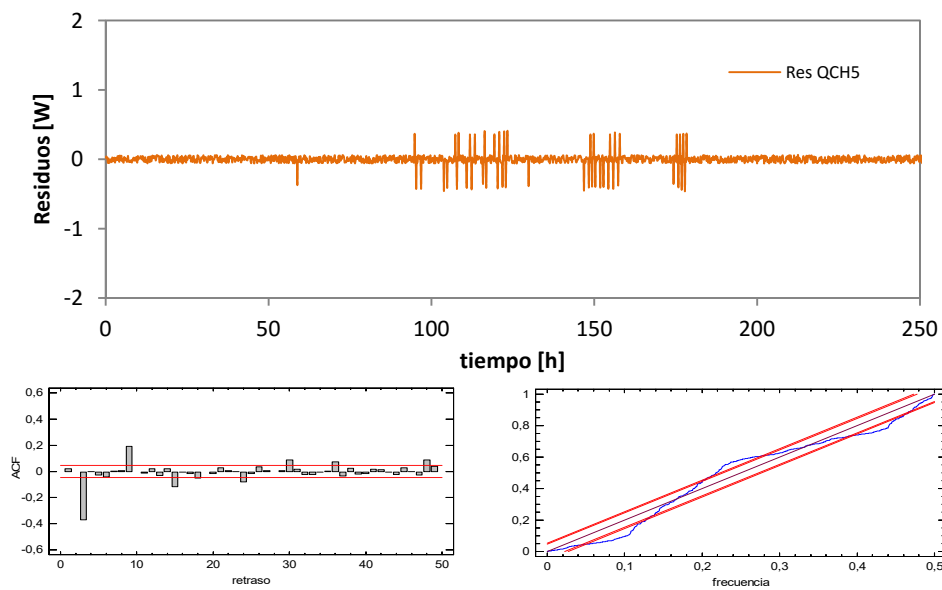


Figura A.72– Análisis del modelo unidimensional de orden 4 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.51 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
$T_{s,c}$	0.2	K	0.001	0.001
$T_{c,e}$	0.5	K	0.002	0.001
Q_{CH5}	0.1	W	0.003	0.001

Tabla A.51 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 4

Modelo 5º orden

En las ecuaciones [A.23] y [A.24] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 5, y en la Tabla A.52 los resultados del modelo y en la Tabla A.53 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \\ dT_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} & \frac{H_5}{C_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_5} & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma]dW \quad [A.23]$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_5(t) \end{bmatrix} + [H_1 \ 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [S_{CH5}]de(t) \quad [A.24]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	0.2	50	500	5.36E-01	1.13E-02	632.3	0.009	0.006
H_2	0.2	50	500	3.92E-01	9.64E-03	41.87	0	0.008
C_1	1	100	500	6.33E+00	2.31E-01	40.736	0	-0.009
C_2	1	100	500	8.64E+00	2.37E-01	14.955	0	0
H_3	0.2	50	500	2.63E+00	8.89E-03	18.54	0.0032	0.007
C_3	1	100	500	2.05E+01	5.09E-01	97.346	0.0057	0.008
H_4	0.2	50	500	5.76E+01	7.28E-03	59.91	0	0
C_4	1	100	500	8.20E+01	4.79E-01	91.086	0.0007	0.006
H_5	0.2	50	500	6.12E+01	2.38E-03	12.09	0	0
C_5	1	100	500	8.94E+00	4.94E-01	77.833	0	0
H_6	0.2	50	500	5.24E+01	4.53E-05	30.298	0	0.005

Tabla A.52 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 5

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅	C ₅	H ₆
H ₁	1										
H ₂	0.23	1									
C ₁	0.32	0.29	1								
C ₂	0.27	0.28	0.26	1							
H ₃	0.19	0.41	0.41	0.18	1						
C ₃	0.28	0.33	0.18	0.24	0.05	1					
H ₄	0.08	0.23	0.34	0.15	0.32	0.02	1				
C ₄	0.30	0.26	0.30	0.24	0.41	0.28	0.32	1			
H ₅	0.04	0.02	0.48	0.24	0.19	0.33	0.29	0.13	1		
C ₅	0.13	0.21	0.24	0.31	0.16	0.28	0.19	0.31	0.09	1	
H ₆	0.04	0.28	0.20	0.38	0.17	0.22	0.31	0.25	0.23	0.01	1

Tabla A.53 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 5

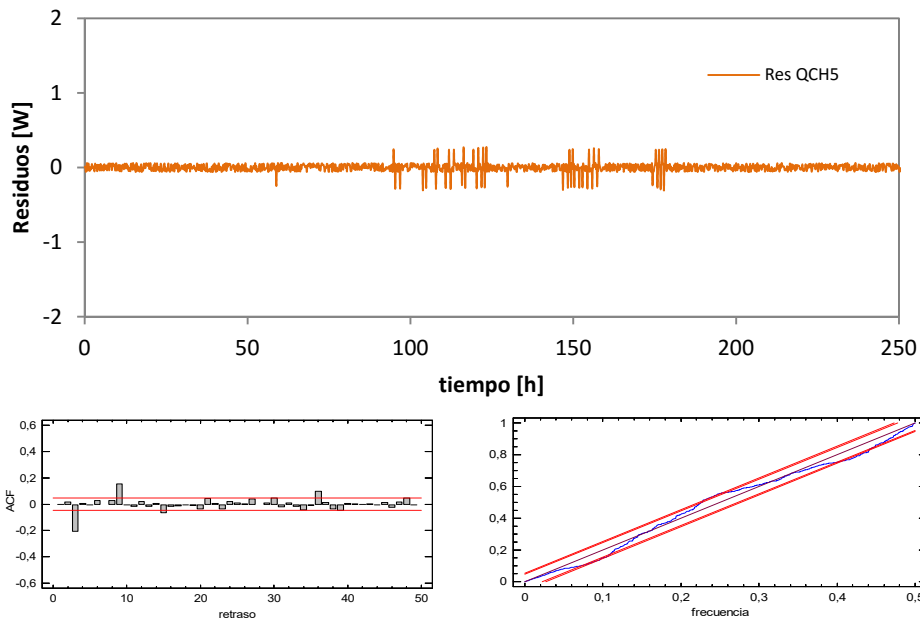


Figura A.73– Análisis del modelo unidimensional de orden 5 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.54 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
T _{s,c}	0.2	K	0.001	0.001
T _{c,e}	0.5	K	0.001	0.001
Q _{CH5}	0.1	W	0.002	0.001

Tabla A.54 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 5

Modelo 6º orden

En las ecuaciones [A.25] y [A.26] se recoge la definición del modelo para el modelo de orden 6, y en la Tabla A.55 los resultados del modelo y en la Tabla A.56 los coeficientes de correlación asociados.

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \\ dT_5 \\ dT_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} & \frac{H_5}{C_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_5} & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_5} & \frac{H_6}{C_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_6}{C_6} & \frac{-(H_6 + H_7)}{C_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} dt \quad [A.25]$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,c} \\ T_{c,e} \end{bmatrix} dt + [\sigma] dW$$

$$[Q_{HFS,CH5m}] = [-H_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_5(t) \\ T_6(t) \end{bmatrix} + [H_1 \ 0] \begin{bmatrix} T_{s,c}(t) \\ T_{c,e}(t) \end{bmatrix} + [SCH5] de(t) \quad [A.26]$$

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	50	500	5.20E-01	1.46E-03	13.720	-0.0034	0.0025
H ₂	0.2	50	500	3.60E-01	9.03E-03	20.43	0.0022	0.0046
C ₁	1	100	500	5.43E+01	1.05E-01	96.59	0	0
C ₂	1	100	500	2.01E+01	1.90E-01	27.4	0	-0.0003
H ₃	0.2	50	500	8.75E+00	1.24E-02	25.22	-0.0045	0.0037
C ₃	1	100	500	1.02E+01	8.43E-01	34.191	0	0
H ₄	0.2	50	500	3.22E+01	1.31E-02	97.3	0	0.0044
C ₄	1	100	500	1.63E+01	2.75E-01	7.243	0	0
H ₅	0.2	50	500	6.94E+01	6.58E-03	16.056	0.0048	0.0046
C ₅	1	100	500	2.71E+00	5.52E-01	56.77	-0.0043	0.0020
H ₆	0.2	50	500	5.40E+01	6.74E-03	97.9	0	0
C ₆	1	100	500	2.41E+01	7.86E-01	57.64	0	0
H ₇	0.2	50	500	1.42E+02	4.70E-03	40.69	0.0042	0

Tabla A.55 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 6

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅	C ₅	H ₆	C ₆	H ₇
H ₁	1												
H ₂	0.34	1											
C ₁	0.33	0.01	1										
C ₂	0.30	0.19	0.30	1									
H ₃	0.19	0.19	0.33	0.25	1								
C ₃	0.16	0.23	0.25	0.02	0.24	1							
H ₄	0.32	0.17	0.06	0.20	0.19	0.18	1						
C ₄	0.18	0.28	0.27	0.42	0.29	0.30	0.21	1					
H ₅	0.24	0.17	0.30	0.28	0.18	0.30	0.29	0.31	1				
C ₅	0.21	0.24	0.29	0.36	0.27	0.32	0.21	0.40	0.39	1			
H ₆	0.20	0.18	0.25	0.50	0.39	0.30	0.46	0.21	0.02	0.40	1		
C ₆	0.19	0.29	0.23	0.39	0.22	0.17	0.30	0.23	0.24	0.46	0.29	1	
H ₇	0.19	0.28	0.40	0.18	0.07	0.14	0.31	0.12	0.28	0.26	0.28	0.28	1

Tabla A.56 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de orden 6

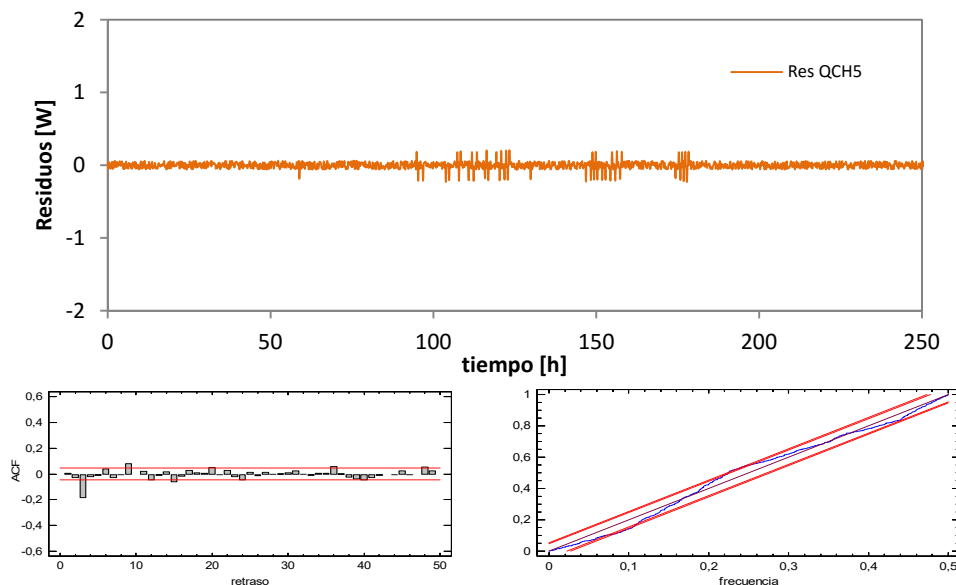


Figura A.74– Análisis del modelo unidimensional de orden 6 para el flujo central del muro de calibración

En la Tabla A.57 se recoge el estudio de propagación de incertidumbres asociado al error en las variables de medida.

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/K]	dC [MJ/K]
T _{s,c}	0.2	K	0.001	0.001
T _{c,e}	0.5	K	0.001	0.001
Q _{CH5}	0.1	W	0.002	0.001

Tabla A.57 – Propagación del error de las variables de medida en el resultado del modelo 6

En la Tabla A.58 se recoge el resumen de resultados obtenidos en el proceso de análisis del modelo de flujo unidimensional en el muro de calibración. Estos mismos resultados se muestran en las gráficas de la Figura A.75.

N	1	2	3	4	5	6	media	σ
H [W/K]	0.212	0.219	0.207	0.203	0.206	0.205	0.205	0.006
C [MJ/K]	0.078	0.079	0.076	0.076	0.076	0.077	0.076	0.001
e [%]	3.4	6.5	0.9	-1.3	0.4	0.0		
	2.4	3.6	-1.0	0.1	0.2	0.7		

Tabla A.58 – Resultados del proceso de identificación para la transmitancia y capacidad térmica de la zona central del muro de calibración

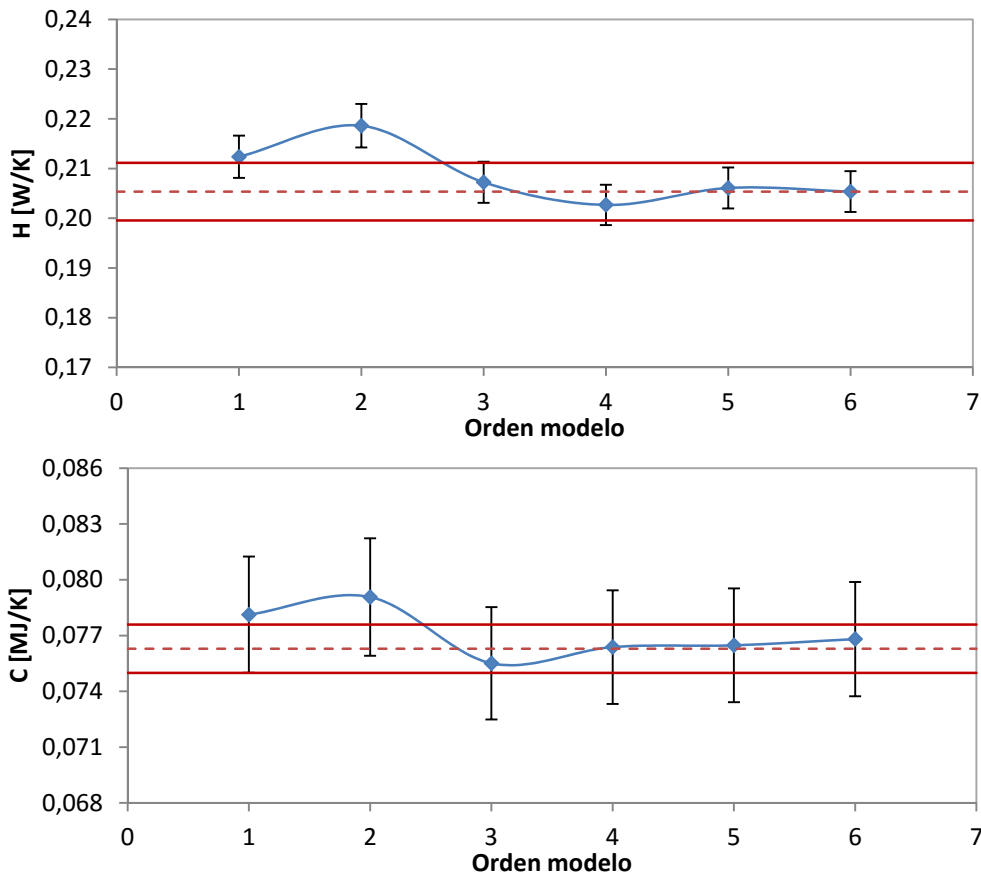


Figura A.75 – Resultados en función del orden del modelo, para el flujo central del muro de calibración

En vista de los resultados, se considera que el modelo óptimo para caracterizar el muro de calibración es el modelo de tercer orden, ya que presenta un comportamiento próximo al de ruido blanco y los resultados de H y C se ajustan a los valores medios obtenidos y están dentro del rango de la desviación estándar. Otro indicativo de que este modelo ya es suficiente para la caracterización del muro es que presenta valores de conductancia muy elevados y valores de capacidades térmicas muy reducidos, valores despreciables dentro del valor final. Esta respuesta es típica en los modelos de identificación de parámetros, ya que en el momento en el que se obtiene el modelo

mínimo necesario para representar el comportamiento de la muestra bajo estudio, aunque se aumente el orden del modelo no se obtienen mejores resultados, ya que los parámetros añadidos no presentan peso en el resultado al tomar valores muy alejados del valor total. Aún así, la experiencia en el trabajo con herramientas de identificación indica que el mejor modelo es aquel que presenta un orden más del mínimo necesario, esos parámetros que toman valores despreciables le permiten a la herramienta ajustar de una forma más adecuada la función objetivo gracias los grados de libertad añadidos. Pero si estos son muchos, el modelo no aporta mayor mejora, y si un aumento importante en la complejidad y en la posibilidad de cometer errores en el ajuste.

A.3.1.2 Flujo de borde

Para estudiar los efectos de borde que se producen en el muro de calibración se emplea un modelo como el mostrado en la Figura A.68 de tercer orden, como se ha determinado en el apartado anterior. La única diferencia en dicho modelo, definido en las ecuaciones [A.19] y [A.20], es que se emplea el flujo de las *tilas* correspondientes a los grupos CH1, CH2, CH3 y CH4 como función objetivo. A continuación se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros para las tres rutinas de ensayo aplicadas en el proceso de calibración.

Resultados rutina *PULSO*

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	10	500	2.43E+00	1.09E-01	111.7111	-0.0257	0
H ₂	0.2	10	500	1.57E+01	7.09E-01	86.5838	-0.0001	0.0001
C ₁	1	100	500	1.55E+02	2.19E+01	30.1808	-0.0001	0.0002
C ₂	1	100	500	1.09E+02	1.58E+01	8.7806	0.0004	0.0001
H ₃	0.2	10	500	3.04E+00	1.36E-01	1.5244	-0.0004	0

Tabla A.59 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina *PULSO*

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	0.225	1			
C ₁	-0.102	-0.214	1		
C ₂	0.027	0.077	-0.014	1	
H ₃	-0.001	0.102	-0.023	0.332	1

Tabla A.60 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina *PULSO*

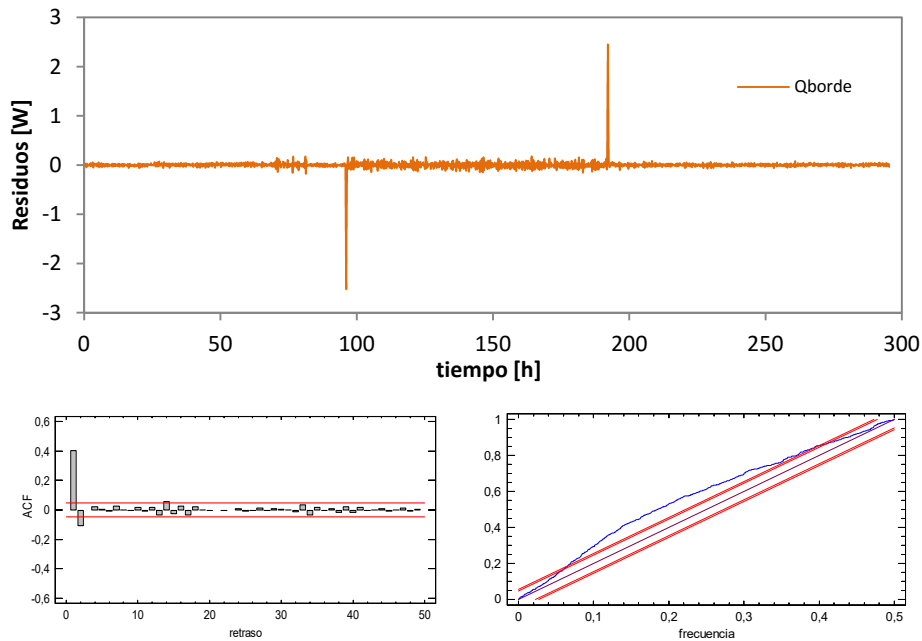


Figura A.76– Análisis del modelo para el flujo de borde del muro de calibración en la rutina PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	10	500	1.27E+00	2.17E-02	10.0296	0	0
H ₂	0.2	10	500	1.22E+00	7.87E-02	2.656	0	0
C ₁	1	100	500	1.46E+02	8.91E+00	6.6086	0	0.2999
C ₂	1	100	500	1.45E+02	1.33E+01	4.4086	0	0.2099
H ₃	0.2	10	500	5.42E+01	1.01E+01	0.9171	0	0.0181

Tabla A.61 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina PRBS

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	0.002	1			
C ₁	0.000	-0.015	1		
C ₂	0.001	-0.004	-0.008	1	
H ₃	-0.001	-0.025	-0.019	0.167	1

Tabla A.62 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina PRBS

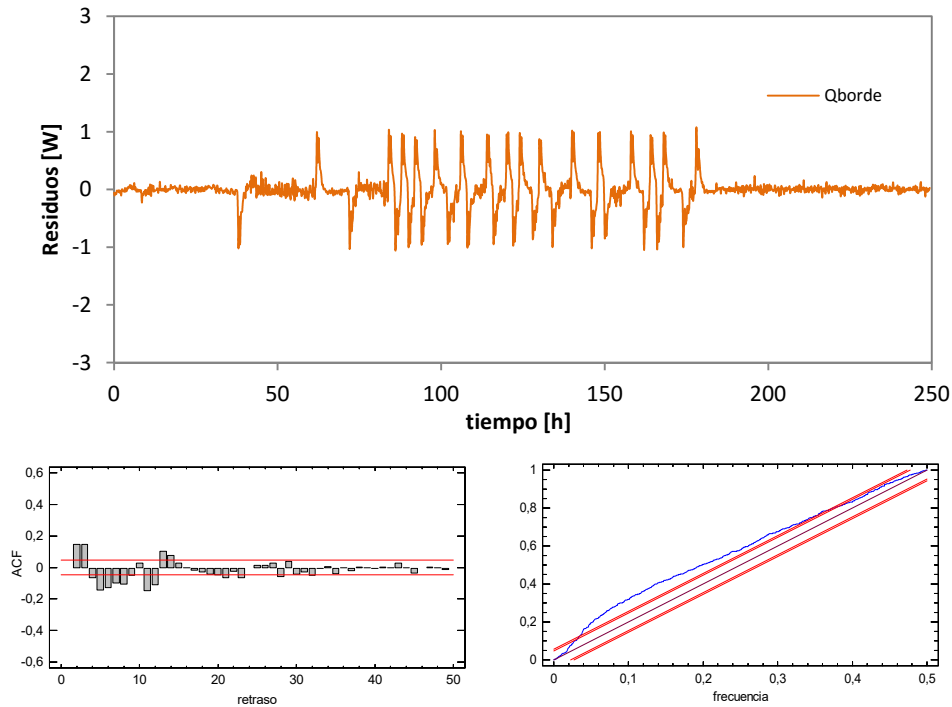


Figura A.77– Análisis del modelo para el flujo de borde del muro de calibración en la rutina PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.2	10	500	1.28E+00	1.81E-02	16.0003	0	0
H ₂	0.2	10	500	1.16E+00	9.25E-02	2.8419	0.0045	0
C ₁	1	100	500	4.39E+02	2.79E+01	17.729	0	0.0012
C ₂	1	100	500	9.22E+00	5.91E+00	1.7631	0.078	0.0001
H ₃	0.2	10	500	6.29E+01	1.27E+01	1.1185	0.2635	0.0001

Tabla A.63 – Resultados del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina ROLBS

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	-0.010	1			
C ₁	-0.002	-0.057	1		
C ₂	0.107	0.012	-0.007	1	
H ₃	0.012	0.031	0.008	0.097	1

Tabla A.64 – Coeficientes correlación variables del proceso de identificación de parámetros en el modelo de borde para la rutina ROLBS

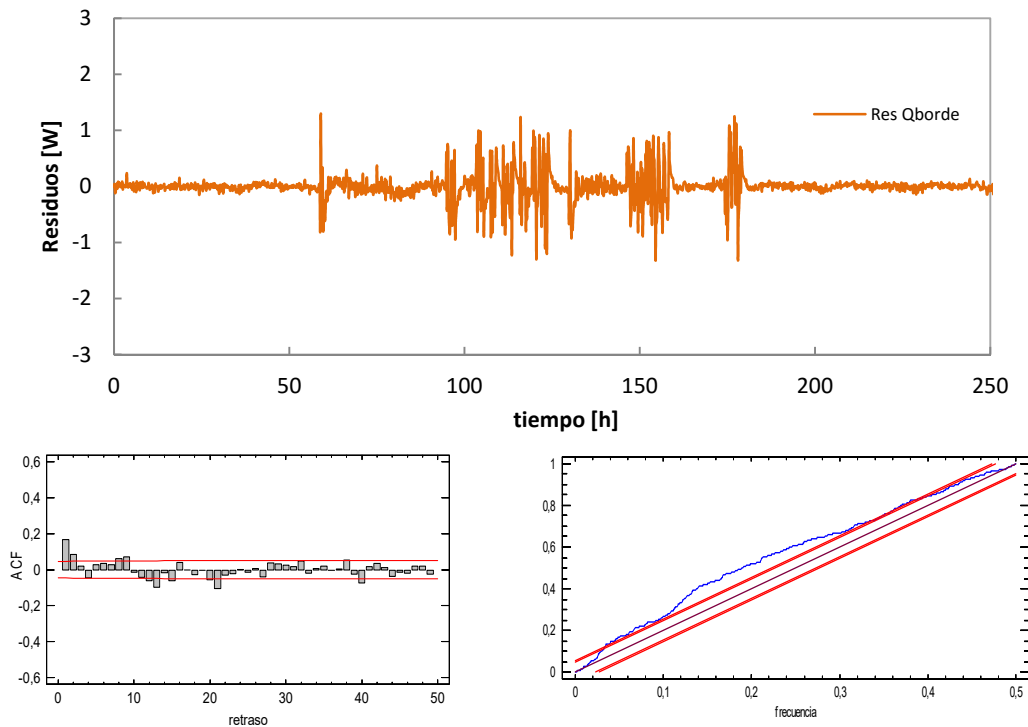


Figura A.78 – Análisis de los efectos de borde del muro de calibración para la excitación ROLBS

En la Tabla A.65 se recoge el resumen de los datos obtenidos en el estudio del flujo de borde que se produce en el muro de calibración.

	H [W/K]	C [MJ/K]
PULSO	0.611	0.277
PRBS	0.607	0.261
ROLBS	0.598	0.274
media	0.605	0.270
σ	0.004	0.005

Tabla A.65 – Resultados del proceso de identificación para la transmitancia y capacidad térmica de la zona de borde del muro de calibración

A.3.1.3 Modelo a escala de celda

A continuación se muestran los resultados del proceso de identificación para el modelo completo de la celda con el muro de calibración teniendo en cuenta la zona de flujo unidimensional y la zona de flujo de borde, ver Figura A.79. En [A.27] y [A.28] se indica las ecuaciones que representan al modelo. Como variables de excitación del modelo se emplean las medidas de potencia inyectada en la sala de ensayos, flujo de calor de la envolvente, temperatura del ambiente exterior y radiación solar incidente sobre la

superficie de la muestra, $[P, Q_{HFS,e}, T_e, G_v]$. Y como funciones objetivo se emplea la temperatura de ambiente interior de la sala de ensayos, la temperatura de la superficie interior de la envoltante, la temperatura interior y exterior del muro de calibración, $[T_i, T_{s,c}, T_{s,e}, T_{c,e}]$.

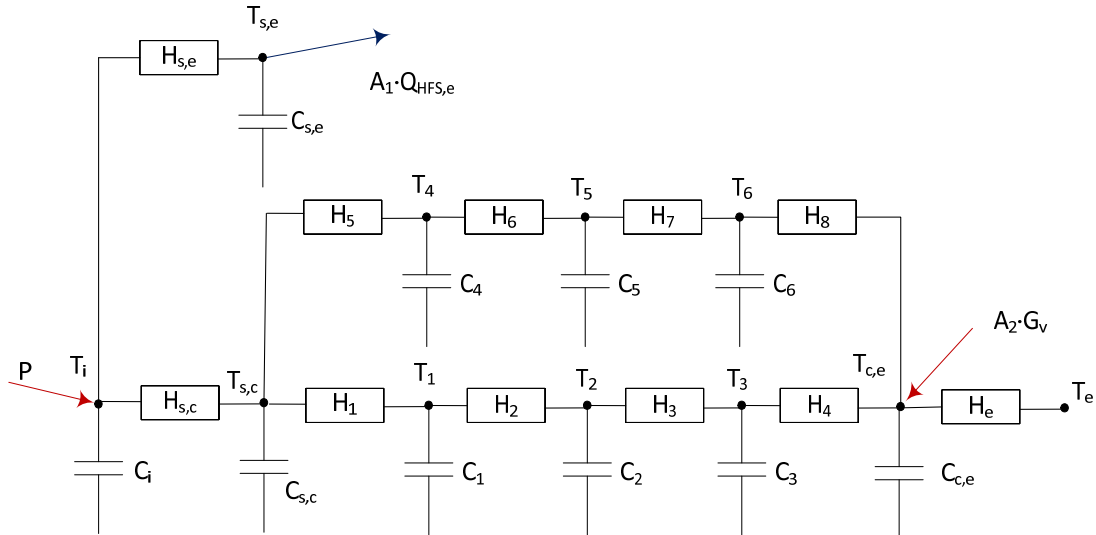


Figura A.79 – Modelo de caracterización para el muro de calibración

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_{s,c} \\ dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{c,e} \\ dT_4 \\ dT_5 \\ dT_6 \\ dT_{s,e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_{s,c} + H_{s,e})}{C_i} & \frac{H_{s,c}}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_{s,e}}{C_i} \\ \frac{H_{s,c}}{C_{s,c}} & \frac{-(H_{s,e} + H_1 + H_5)}{C_{s,c}} & \frac{H_1}{C_{s,c}} & 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_{s,c}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_1}{C_1} & \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_{c,e}} & \frac{-(H_4 + H_6)}{C_{c,e}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_4} & \frac{H_6}{C_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-(H_6 + H_7)}{C_5} & \frac{H_7}{C_5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_7}{C_6} & 0 & \frac{-(H_7 + H_8)}{C_6} & 0 & 0 \\ \frac{H_{s,e}}{C_{s,e}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-H_{s,e}}{C_{s,e}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{c,e} \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_{s,e} \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-A_1}{C_{s,e}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} dt + [e] dt \tag{A.27}$$

$$\begin{bmatrix} T_i^m \\ T_{s,c}^m \\ T_{c,e}^m \\ T_{s,e}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_{s,c} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{c,e} \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_{s,e} \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} + [e] \tag{A.28}$$

Resultados rutina PULSO

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	df/dPar	dPen/dPar
H _{s,c}	10	70	150	5.96E+01	8.01E+00	33.4676	0	0
H _{s,e}	100	350	500	2.40E+02	6.81E+00	22.2749	-0.0002	-0.0001
C _i	10	40	100	3.06E+01	4.76E+00	1.5296	-0.0005	-0.0016
C _{s,c}	100	280	400	2.72E+02	9.94E+00	4.0943	0.0016	0
H ₁	0.2	1	100	2.55E+01	5.28E+00	5.7592	0.0007	0
H ₅	0.2	10	500	1.53E+00	2.33E-01	7.0812	-0.0014	-0.0008
C ₁	1	50	150	3.86E+01	4.28E+00	3.4428	0.0006	0.0003
H ₂	0.2	1	100	4.35E-01	2.36E-02	24.3100	-0.0004	-0.0001
C ₂	1	50	150	1.41E+01	1.49E+00	7.8405	0.0002	0
H ₃	0.2	1	100	4.37E-01	6.09E-02	3.0381	0.0006	0.0002
C ₃	1	50	150	4.22E+01	5.72E+00	0.6293	-0.0005	-0.0002
H ₄	0.2	1	100	6.23E+01	3.50E+00	10.0604	-0.0006	-0.0003
C _{c,e}	1	50	100	4.43E+01	1.74E+00	4.1492	0.0001	0.0022
H _e	5	25	50	1.94E+01	4.24E-01	13.7667	0	-0.0013
C ₄	10	100	500	2.95E+02	5.69E+01	0.3277	0.0001	0.0004
H ₆	0.2	10	500	2.37E+00	1.51E-01	13.7608	0.0002	-0.0007
C ₅	10	100	500	5.04E+01	4.19E+01	3.7894	0.0008	-0.0004
H ₇	0.2	10	500	1.15E+01	2.46E-01	10.2720	0.0022	-0.0004
H ₈	0.2	10	500	2.28E+00	2.47E-01	31.9214	-0.0011	0
C ₆	10	100	500	6.50E+01	2.73E+01	24.9670	0.0004	-0.0004
C _{s,e}	500	900	1500	8.73E+02	3.43E+01	0.0186	-0.0005	0.0020
A ₂	0.1	0.5	0.9	3.21E-01	7.48E-02	24.3490	0	0
A ₁	0.9	1	1.1	1.04E+00	4.61E-03	20.4272	-0.0004	0.0011

Tabla A.66 – Resultados identificación parámetros para la rutina PULSO en el modelo completo de muro de calibración

	H _{s,c}	H _{s,e}	C _i	C _{s,c}	H ₁	H ₅	C ₁	H ₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C _{c,e}	H _e	C ₄	H ₆	C ₅	H ₇	H ₈	C ₆	C _{s,e}	A ₂	A ₁		
H _{s,c}	1																								
H _{s,e}	0.5	1																							
C _i	0.0	0.6	1																						
C _{s,c}	0.2	0.8	0.5	1																					
H ₁	0.1	0.3	0.7	0.5	1																				
H ₅	0.2	0.4	0.3	0.9	0.1	1																			
C ₁	0.2	0.1	0.2	0.7	0.9	0.8	1																		
H ₂	0.2	0.8	0.3	0.7	0.3	0.7	0.5	1																	
C ₂	0.3	0.9	0.7	0.7	0.8	1.0	0.4	0.0	1																
H ₃	0.3	0.8	0.2	0.1	0.7	0.4	1.0	0.9	0.1	1															
C ₃	0.5	0.7	0.1	0.2	0.2	0.8	0.2	0.7	0.3	0.1	1														
H ₄	0.2	0.4	0.7	0.3	0.6	0.0	0.1	0.8	0.7	0.6	0.4	1													
C _{c,e}	0.5	0.9	0.8	0.5	0.4	0.9	0.4	0.7	0.1	0.8	0.1	0.7	1												
H _e	0.8	0.4	0.6	0.5	0.2	0.7	0.2	0.5	0.9	0.2	0.6	0.2	0.9	1											
C ₄	1.0	0.8	0.4	0.5	0.8	0.9	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.6	0.4	1										
H ₆	0.7	1.0	0.6	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	0.1	0.9	0.4	0.8	0.0	0.9	0.1	1									
C ₅	0.1	0.0	0.3	0.9	0.9	0.4	0.7	1.0	1.0	0.1	1.0	0.5	0.6	0.4	0.7	0.4	1								
H ₇	0.7	0.2	0.5	0.7	0.1	0.6	0.2	0.2	0.7	0.6	0.2	0.7	0.5	0.5	0.6	0.1	0.6	1							
H ₈	0.7	0.5	0.1	0.5	0.2	0.3	0.8	0.3	0.0	1.0	0.8	0.3	0.4	0.1	1.0	0.6	0.1	0.6	1						
C ₆	0.9	0.2	0.5	0.4	0.3	0.6	0.7	1.0	0.3	0.7	0.0	0.0	0.3	0.2	0.3	0.9	1.0	0.6	0.0	1					
C _{s,e}	0.2	0.5	0.9	0.3	0.9	0.4	0.3	0.1	0.4	0.4	0.7	0.8	0.8	0.7	0.4	0.6	0.7	0.6	0.2	0.7	1				
A ₂	0.0	0.5	0.8	0.1	1.0	0.4	0.9	0.8	0.2	0.1	0.2	0.4	0.9	0.7	0.4	0.8	0.6	0.0	0.0	0.3	0.2	1			
A ₁	0.9	0.9	0.8	0.9	0.2	0.6	0.5	0.7	0.2	0.6	0.7	0.6	0.9	0.6	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.2	1		

Tabla A.67 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro calibración para la rutina PULSO

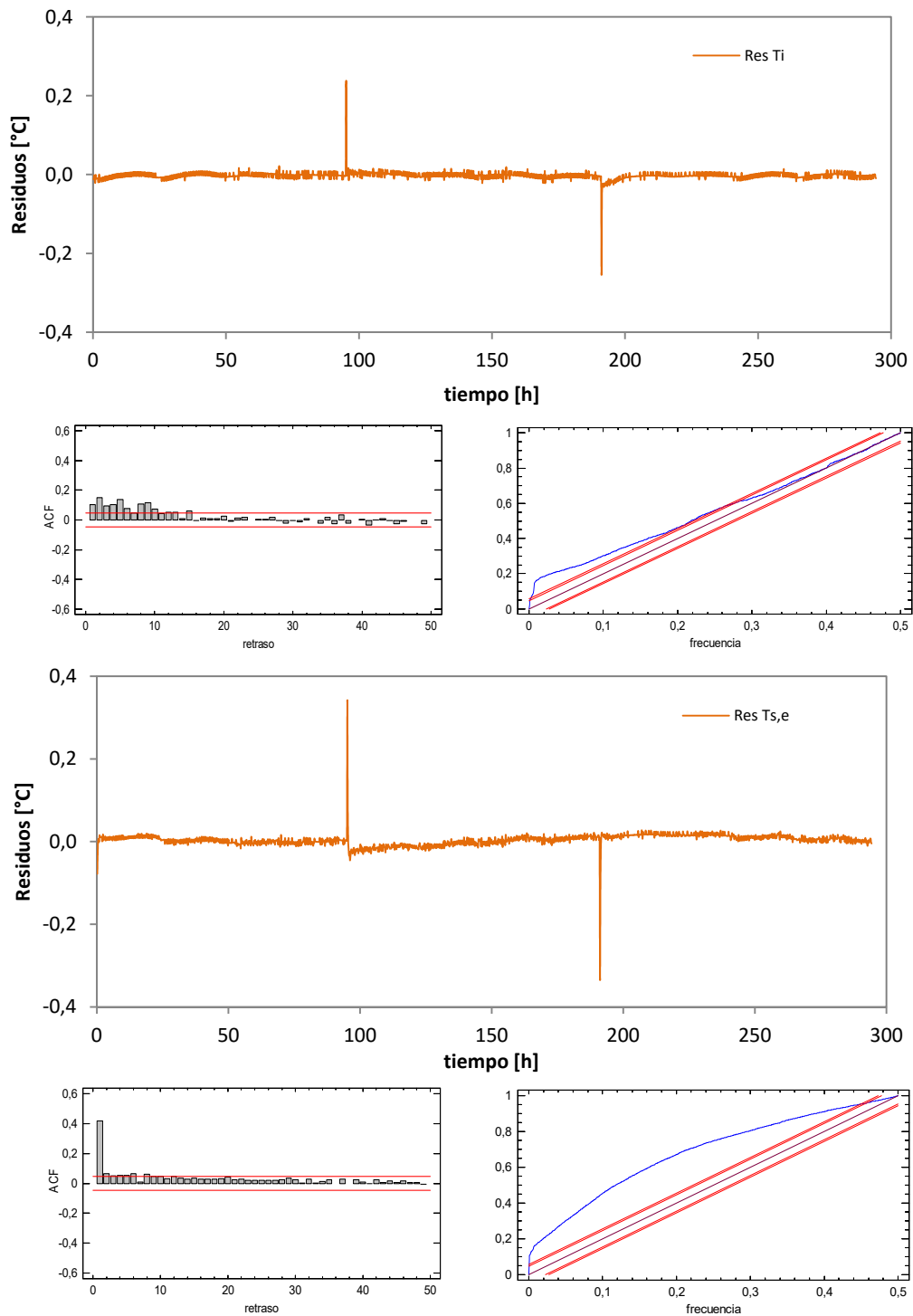


Figura A.80 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación PULSO

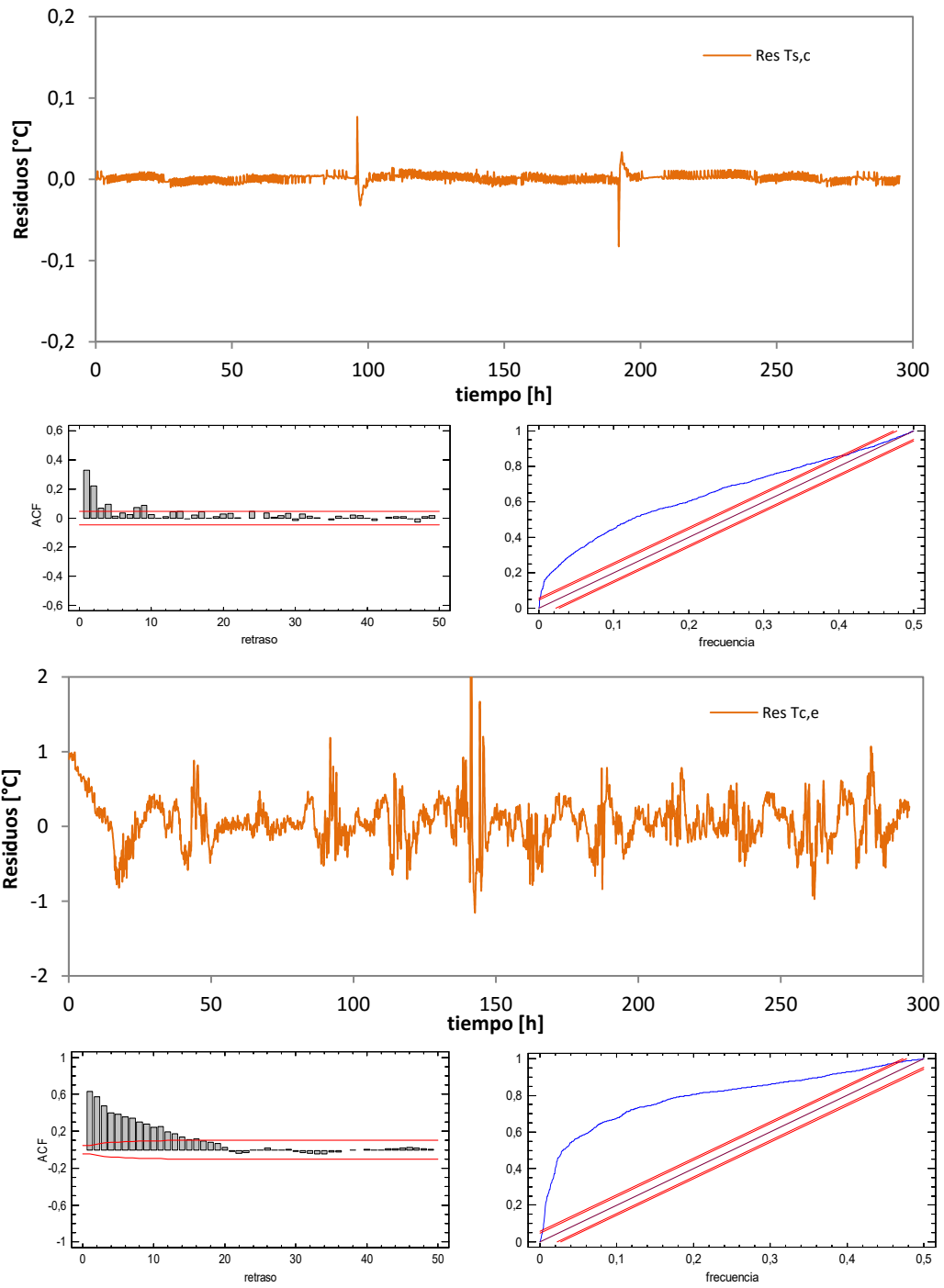


Figura A.81 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación PULSO

Resultados rutina PRBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H _{5,c}	10	70	150	4.77E+01	3.06E+00	97.223	0.0019	0.0034
H _{5,e}	100	350	500	3.52E+02	8.69E+00	57.829	-0.0025	0
C _i	10	40	100	7.51E+01	9.02E+00	88.065	0.002	-0.003
C _{5,c}	100	280	400	2.43E+02	8.83E+00	2.313	-0.0037	-0.0029
H ₁	0.2	1	100	1.45E+01	2.68E+00	63.97	0.0047	-0.0004
H ₅	0.2	10	500	6.59E-01	7.44E-02	81.109	0.0028	0.0019
C ₁	1	50	150	1.37E+01	4.96E+00	11.6455	0.0036	0.0031
H ₂	0.2	1	100	2.21E-01	1.90E-02	2.523	0.0021	0.0036
C ₂	1	50	150	6.09E+01	9.11E+00	0.1786	0.0030	-0.003
H ₃	0.2	1	100	3.65E+00	3.73E-02	74.842	-0.0045	0.0037
C ₃	1	50	150	6.33E+01	5.35E+00	28.295	0.0033	0.0020
H ₄	0.2	1	100	4.08E+00	1.83E-01	56.452	-0.0017	0.0043
C _{c,e}	1	50	100	5.84E+00	3.96E+00	29.117	-0.0015	-0.0027
H _e	5	25	50	2.30E+01	8.97E+00	9.4336	0.0022	0.0046
C ₄	10	100	500	5.02E+02	5.23E+00	75.264	-0.0033	-0.0015
H ₆	0.2	10	500	1.43E+02	9.02E-02	47.049	0.0006	-0.0034
C ₅	10	100	500	1.45E+00	4.69E+01	39.480	-0.0001	-0.0033
H ₇	0.2	10	500	8.90E+01	1.77E-01	51.810	0.0029	-0.0022
H ₈	0.2	10	500	1.10E+02	6.04E-01	31.126	0.0005	-0.003
C ₆	10	100	500	4.40E+02	3.06E+01	1.4267	0.0028	0.0001
C _{5,e}	500	900	1500	9.35E+02	8.89E+00	87.365	-0.0034	-0.0029
A ₂	0.1	0.5	0.9	2.66E-01	2.32E-02	4.8759	-0.0049	-0.0011
A ₁	0.9	1	1.1	2.65E+01	4.25E+00	59.336	-0.0012	0.002

Tabla A.68 – Resultados identificación parámetros para la rutina PRBS en el modelo completo de muro de calibración

	H _{5,c}	H _{5,e}	C _i	C _{5,c}	H ₁	H ₅	C ₁	H ₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C _{c,e}	H _e	C ₄	H ₆	C ₅	H ₇	H ₈	C ₆	C _{5,e}	A ₂	A ₁		
H _{5,c}	1																								
H _{5,e}	0.1	1																							
C _i	0.8	0.7	1																						
C _{5,c}	0.1	0.4	0.1	1																					
H ₁	0.8	0.5	0.9	0.5	1																				
H ₅	0.6	0.1	0.3	0.4	0.7	1																			
C ₁	0.9	0.8	0.3	0.3	0.7	0.0	1																		
H ₂	0.1	0.6	0.3	0.0	0.5	0.8	0.4	1																	
C ₂	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.4	0.3	0.9	1																
H ₃	0.2	0.1	0.5	1.0	0.3	0.0	0.8	0.0	0.6	1															
C ₃	0.9	0.2	0.7	1.0	0.3	0.4	0.7	0.2	0.3	0.0	1														
H ₄	0.8	0.6	0.1	0.9	0.1	0.5	0.3	0.6	1.0	0.1	0.9	1													
C _{c,e}	0.9	0.2	0.7	0.2	0.5	0.5	0.9	0.0	0.8	0.6	0.7	0.4	1												
H _e	0.9	0.4	0.2	0.1	1.0	0.4	0.6	0.5	0.5	0.7	0.8	0.4	0.1	1											
C ₄	0.8	0.9	0.1	0.5	0.7	0.2	0.8	0.8	0.7	0.4	0.9	0.7	0.1	0.1	1										
H ₆	0.6	0.7	0.5	0.7	0.5	0.4	0.5	0.3	0.8	0.1	0.3	0.8	0.9	0.7	0.8	1									
C ₅	0.8	0.9	0.8	0.5	0.8	0.8	0.0	0.5	0.6	1.0	0.3	0.7	0.8	0.8	0.6	0.0	1								
H ₇	0.9	0.6	0.8	0.7	0.2	0.4	0.8	0.0	0.1	0.2	0.1	0.5	0.0	0.4	0.4	0.4	1.0	1							
H ₈	0.3	0.4	0.1	1.0	0.5	0.4	0.2	0.4	0.5	0.8	0.7	0.0	1.0	0.8	0.9	0.3	0.4	0.5	1						
C ₆	0.9	0.6	0.1	0.8	0.1	0.1	0.6	0.3	0.4	0.9	0.8	0.3	0.2	0.1	0.4	0.8	0.4	0.4	0.9	1					
C _{5,e}	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	1.0	1.0	0.5	0.4	0.6	0.2	0.2	0.1	0.4	0.9	0.9	0.7	0.9	0.2	1				
A ₂	0.2	0.4	0.9	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.9	0.7	0.8	0.3	0.9	0.7	0.2	0.2	0.2	0.0	0.8	1.0	0.9	1			
A ₁	0.1	0.8	0.3	0.3	0.4	0.9	0.3	0.0	0.9	0.3	0.4	0.3	0.6	0.3	0.6	0.5	0.5	0.3	0.7	0.8	0.6	0.5	1		

Tabla A.69 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro calibración para la rutina PRBS

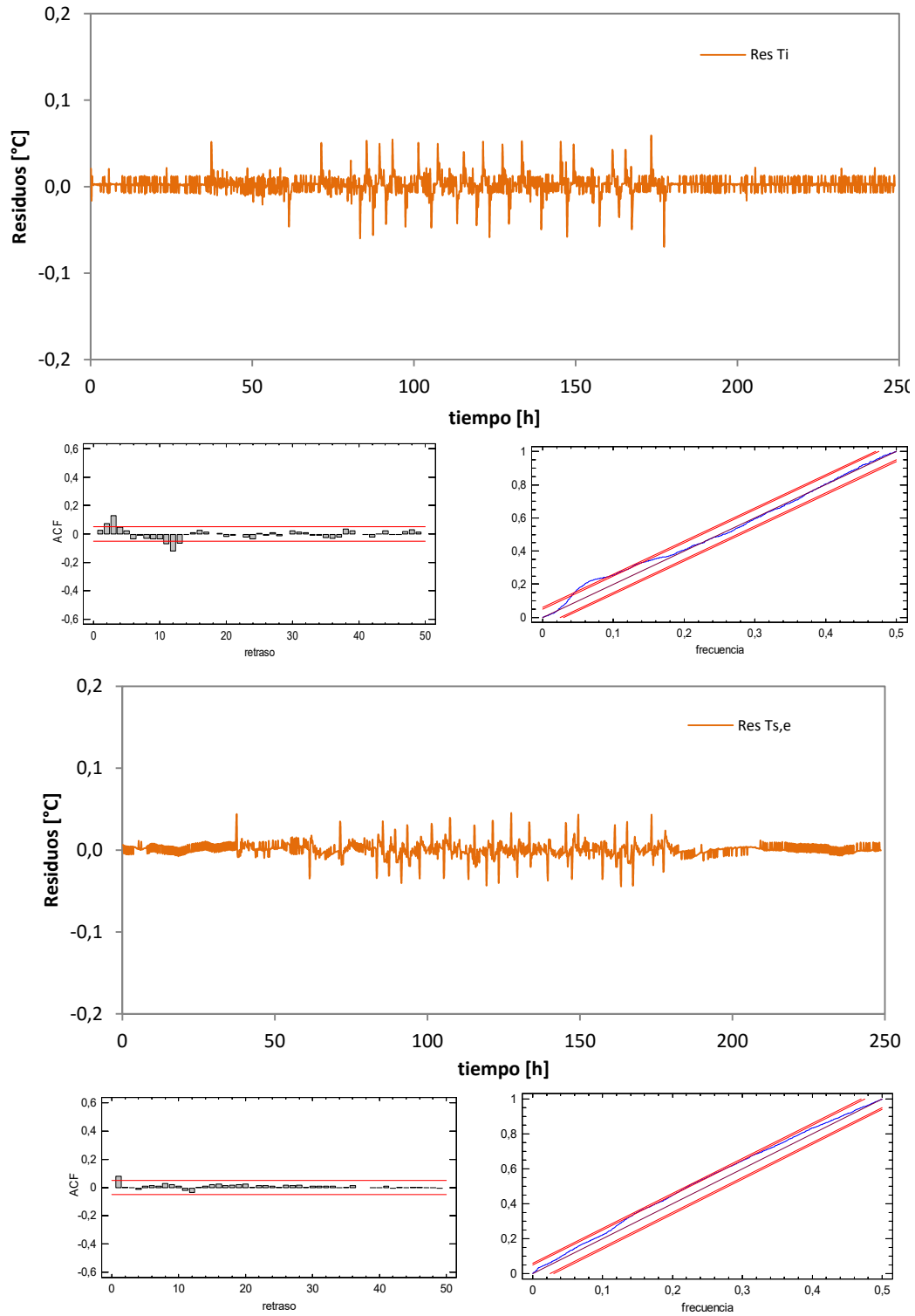


Figura A.82 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación PRBS

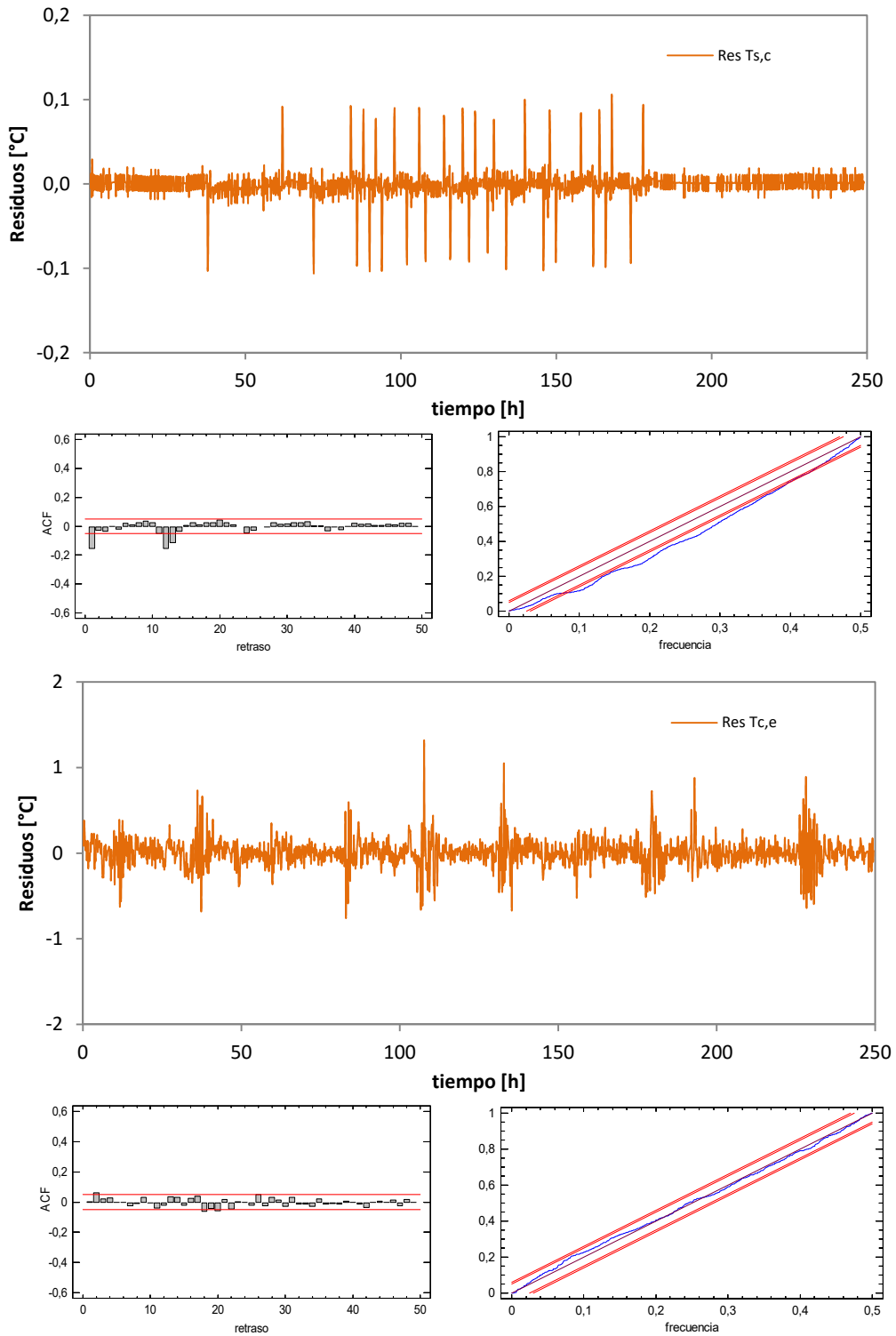


Figura A.83 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación PRBS

Resultados rutina ROLBS

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H _{s,c}	10	70	150	5.95E+01	6.67E+00	77.292	0.0024	0
H _{s,e}	100	350	500	3.98E+02	8.27E+00	85.170	0	0
C _i	10	40	100	6.83E+01	1.82E+00	9.2447	-0.0032	0.0024
C _{s,c}	100	280	400	2.99E+02	2.00E+00	10.109	-0.0026	0
H ₁	0.2	1	100	6.17E+00	2.33E+00	7.456	0.0019	0.0047
H ₅	0.2	10	500	4.62E+00	1.27E+00	5.7969	0.0018	0.0029
C ₁	1	50	150	3.74E+01	4.67E+00	41.803	0.0049	-0.0033
H ₂	0.2	1	100	2.54E-01	2.94E-02	71.925	0	0.0017
C ₂	1	50	150	6.11E+01	1.22E+01	96.821	0.0033	-0.0047
H ₃	0.2	1	100	3.11E+00	1.70E-01	3.993	-0.0021	0.0012
C ₃	1	50	150	5.29E+00	2.74E+00	89.368	-0.0042	0.0029
H ₄	0.2	1	100	2.89E+01	2.25E+00	59.850	0.0045	-0.0009
C _{c,e}	1	50	100	2.66E+00	9.54E-01	55.511	0.0042	0
H _e	5	25	50	2.11E+01	4.93E+00	33.4387	-0.0026	0
C ₄	10	100	500	2.91E+02	1.88E+01	18.947	0	0.0029
H ₆	0.2	10	500	1.83E+00	1.25E-01	90.754	-0.0016	-0.0034
C ₅	10	100	500	3.10E+01	1.06E+01	21.289	0.0029	0
H ₇	0.2	10	500	1.25E+00	2.08E-01	58.376	0	0.0020
H ₈	0.2	10	500	5.47E+01	2.16E-01	49.605	0.0031	0.0008
C ₆	10	100	500	8.48E+01	3.12E+01	60.642	0	-0.0041
C _{s,e}	500	900	1500	9.32E+02	7.50E+00	79.204	-0.0048	0.0019
A ₂	0.1	0.5	0.9	2.98E-01	4.56E-03	91.854	-0.0025	0.0046
A ₁	0.9	1	1.1	9.64E-01	8.33E-02	0.1302	0.0038	0.0017

Tabla A.70 – Resultados identificación parámetros para la rutina ROLBS en el modelo completo de muro de calibración

	H _{s,c}	H _{s,e}	C _i	C _{s,c}	H ₁	H ₅	C ₁	H ₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C _{c,e}	H _e	C ₄	H ₆	C ₅	H ₇	H ₈	C ₆	C _{s,e}	A ₂	A ₁	
H _{s,c}	1																							
H _{s,e}	0.3	1																						
C _i	0.6	0.9	1																					
C _{s,c}	0.1	1.0	0.1	1																				
H ₁	0.3	0.8	0.3	0.8	1																			
H ₅	0.3	0.7	0.5	0.6	0.6	1																		
C ₁	0.2	0.3	0.8	0.8	0.6	0.2	1																	
H ₂	0.9	0.4	0.2	0.5	0.2	0.9	0.9	1																
C ₂	0.8	0.8	0.3	0.3	0.0	0.9	0.3	0.6	1															
H ₃	0.9	0.3	1.0	0.8	0.6	0.7	0.6	0.9	0.4	1														
C ₃	0.3	0.4	0.6	0.5	0.2	0.8	0.5	0.1	0.2	0.3	1													
H ₄	0.6	0.4	0.5	0.0	0.7	0.2	0.8	0.4	0.2	0.2	0.9	1												
C _{c,e}	0.4	0.7	0.7	0.6	0.7	0.2	0.0	0.9	0.9	0.9	0.1	0.8	1											
H _e	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	1.0	0.3	0.9	0.2	0.8	0.7	0.2	1										
C ₄	0.8	0.8	0.3	0.1	0.7	0.1	0.5	0.2	0.6	0.6	0.7	0.5	0.3	1.0	1									
H ₆	0.4	0.1	0.9	0.0	0.9	0.1	0.0	0.8	0.0	0.2	0.2	0.2	0.7	0.7	0.2	1								
C ₅	0.2	0.9	0.6	0.5	0.7	0.4	0.5	0.8	0.3	0.6	0.2	0.4	0.5	0.6	0.1	0.4	1							
H ₇	0.8	0.6	0.1	0.4	0.3	0.2	1.0	0.2	0.4	0.5	0.8	0.5	0.1	0.3	0.1	0.8	0.2	1						
H ₈	0.0	0.1	0.9	0.0	0.3	0.2	0.3	0.2	0.4	0.5	0.4	0.7	0.4	0.9	0.8	0.7	0.5	0.7	1					
C ₆	0.8	0.9	0.6	0.8	0.2	0.7	0.1	0.3	0.2	0.4	0.8	0.8	0.1	0.4	0.5	0.9	0.4	0.9	0.6	1				
C _{s,e}	0.9	0.4	0.3	1.0	0.3	0.1	0.0	0.9	0.1	0.8	0.6	0.6	0.2	0.2	0.6	0.1	0.6	0.7	0.8	0.6	1			
A ₂	0.8	0.3	0.0	0.6	1.0	0.8	1.0	0.9	0.7	0.7	1.0	0.8	0.1	0.8	0.4	0.2	0.7	0.8	0.4	0.4	0.2	1		
A ₁	0.7	0.0	0.2	0.8	0.1	0.1	0.6	0.8	0.3	0.3	0.7	0.6	0.5	0.8	0.8	0.9	0.0	1.0	0.3	0.1	1.0	0.7	1	

Tabla A.71 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro calibración para la rutina ROLBS

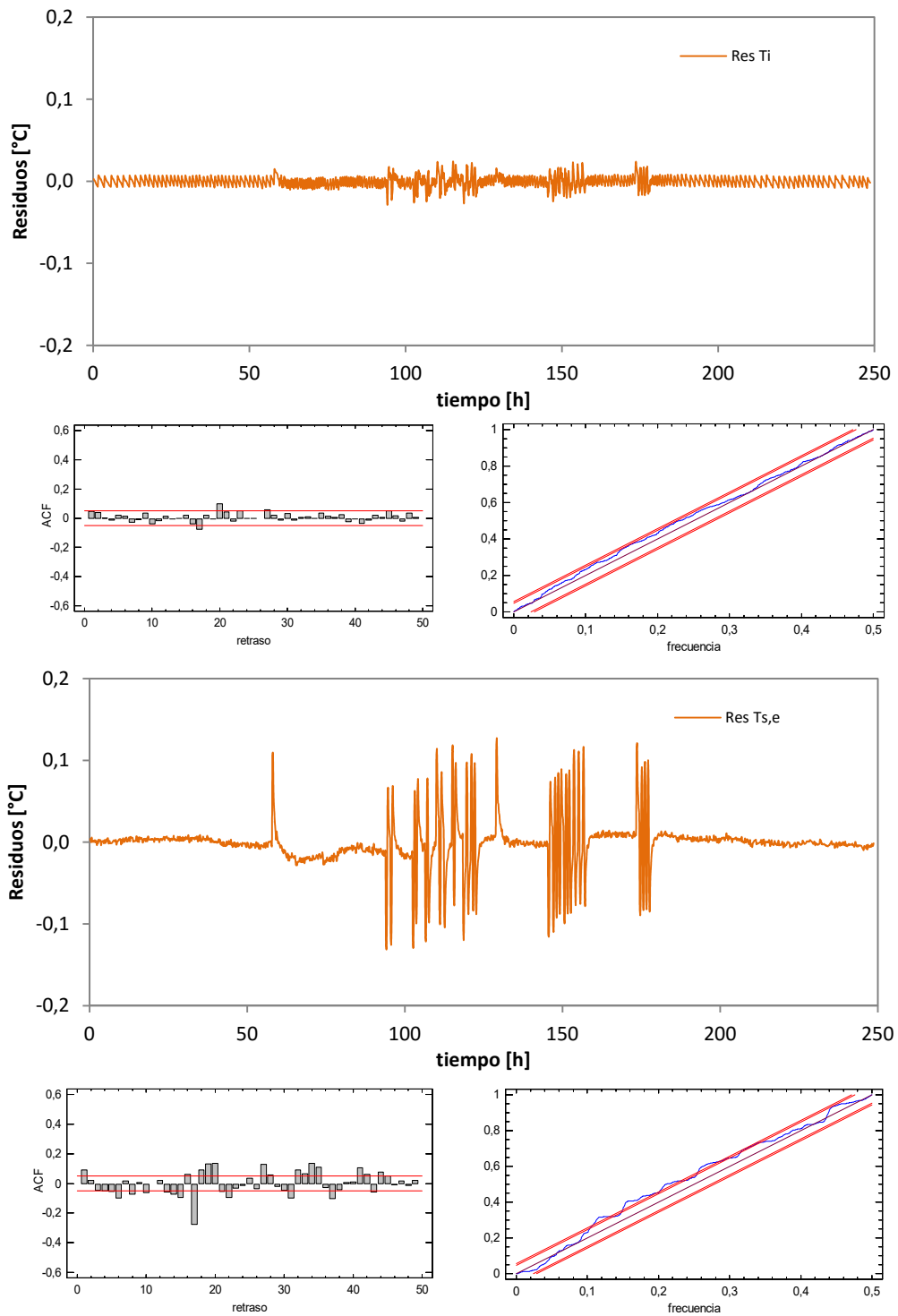


Figura A.84 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación ROLBS

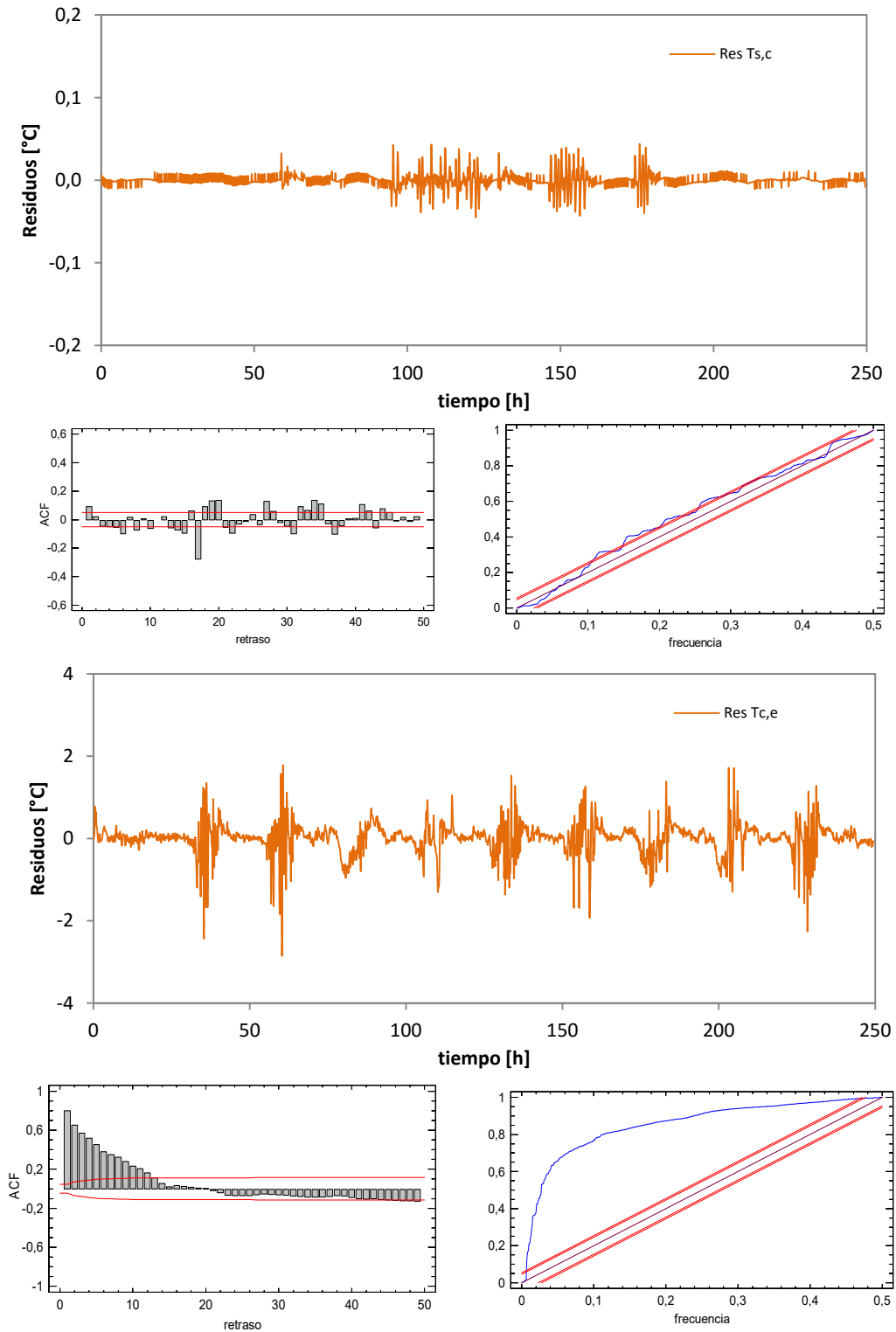


Figura A.85 – Análisis de residuos de las temperaturas en el modelo del muro de calibración, excitación ROLBS

Una vez estudiadas todas las rutinas, se analizan los resultados obtenidos para la conductancia, H , y la capacidad térmica de cada una de las ramas del modelo, que a su vez representan la zona central del muro de calibración, donde se producen condiciones de flujo unidimensional, y para la zona de borde, donde el flujo es bidimensional. También se analiza el comportamiento de la superficie exterior del muro de calibración frente a las condiciones ambientales mediante los parámetros de apertura solar, A_{Gv} , y coeficiente de convección exterior, H_e . En la Tabla A.72 se muestra dicho resumen de resultados totales.

	centro		borde		A_{Gv} [-]	H_{ce} [MJ/K]
	H [W/K]	C [W/m ² K]	H [MJ/K]	C [MJ/m ² K]		
PULSO	0.215	0.064	0.625	0.266	0.321	19.545
PRBS	0.196	0.084	0.648	0.285	0.265	22.986
ROLBS	0.224	0.063	0.633	0.245	0.298	21.098
medio	0.212	0.070	0.635	0.265	0.295	21.210
σ	0.014	0.012	0.012	0.020	0.028	1.723
ref	0.205	0.076	0.605	0.270		
Dif [%]	3.1	-8.0	4.9	-1.8		

Tabla A.72 – Resultados finales del estudio de caracterización del muro de calibración

Anexo B

ENSAYO IQ-Test





B.1 Datos experimentales

El estudio de trazabilidad *IQ-Test* está configurado por el ensayo de dos componentes, el primero formado por un muro opaco con la zona central desmontable y que se sustituya por una ventana de referencia en el segundo ensayo. A su vez, en este estudio se realizan dos ensayos por muestra, el primero con el componente situado a ras del interior del portamuestras y el segundo con la muestra a ras del exterior. Ambas configuraciones tienen aspectos positivos y negativos, respecto a efectos de puente térmico y respecto al sombreado del componente. Esta duplicidad del estudio permite caracterizar dichos efectos y seleccionar la ubicación óptima de las probetas en el desarrollo de los ensayos posteriores. A continuación se muestran los datos de ensayo que no se recogen en la Memoria debido a su extensión.

B.1.1 Primer componente

En los siguientes apartados se recogen los resultados de la verificación de infiltraciones al inicio y fin de los dos ensayos del muro opaco y los datos de flujos de envolvente en la sala de ensayos y la temperatura de las diferentes capas de la probeta para el muro opaco.

B.1.1.1 Ensayo de infiltraciones

En la Tabla B.1 se indican los valores de renovación de aire que se dan en la sala de ensayos debido a infiltraciones para el componente opaco durante los dos periodos de ensayo que se le aplican. En la Figura B.1 y Figura B.2 se muestran los datos de la prueba.

	m_a [ren/h]	
	INICIO	FIN
OPACO-1	0.090	0.134
OPACO-2	0.156	0.224

Tabla B.1 – Resultado de la prueba de infiltraciones para el inicio y fin de los dos ensayos realizados al muro opaco

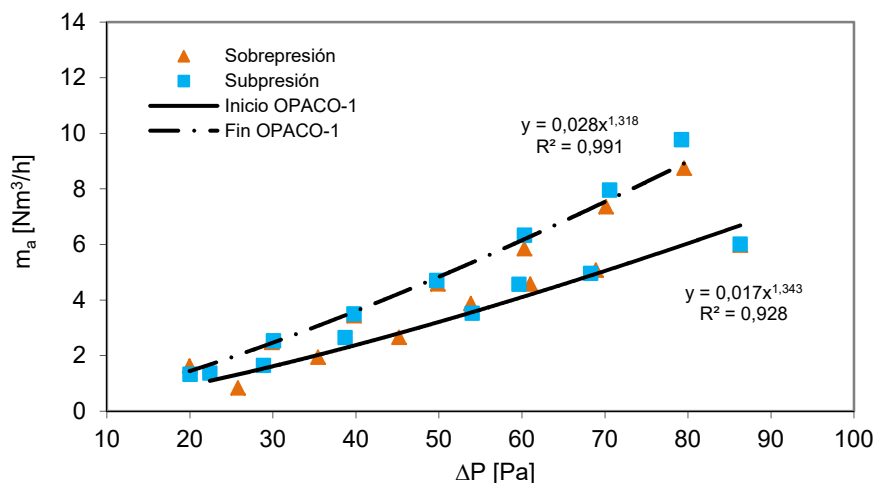


Figura B.1 – Medida de las infiltraciones para el primer ensayo del muro opaco

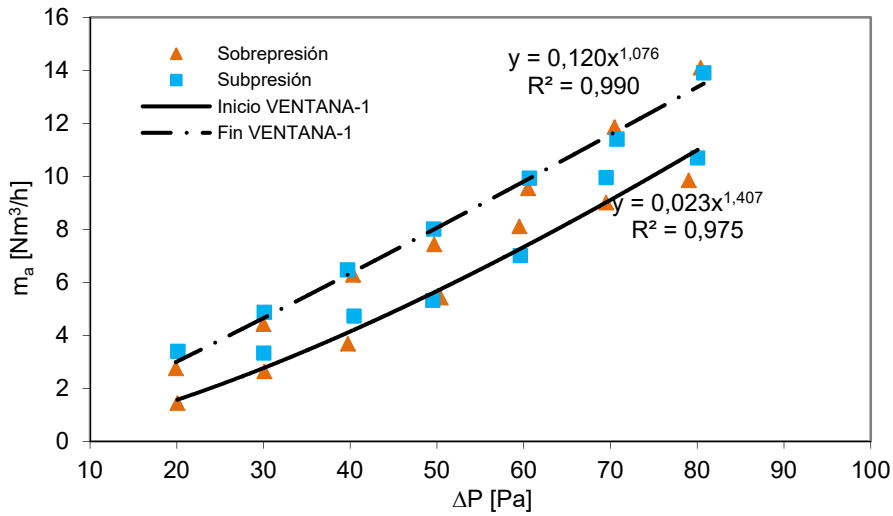


Figura B.2 – Medida de las infiltraciones para el segundo ensayo del muro opaco

Se realiza una prueba previa al inicio del ensayo, de forma que se aplican medidas de sellado hasta que se obtienen tasas aceptables de infiltraciones. Y una vez finalizado, antes de acceder a la sala de ensayos, se realiza de nuevo la prueba de infiltraciones. Repasando los resultados, se puede observar que la colocación de la probeta a ras del exterior en el portamuestras complica el sellado, ya que se obtienen valores más altos de infiltraciones, incluso en el inicio del ensayo.

B.1.1.2 Flujos y temperaturas

A continuación se muestran las medidas de flujo de calor en la envolvente durante el primer ensayo del muro opaco. Verificar la correcta medida de los grupos de *tiles* es fundamental para obtener resultados fiables durante el proceso de identificación de parámetros.

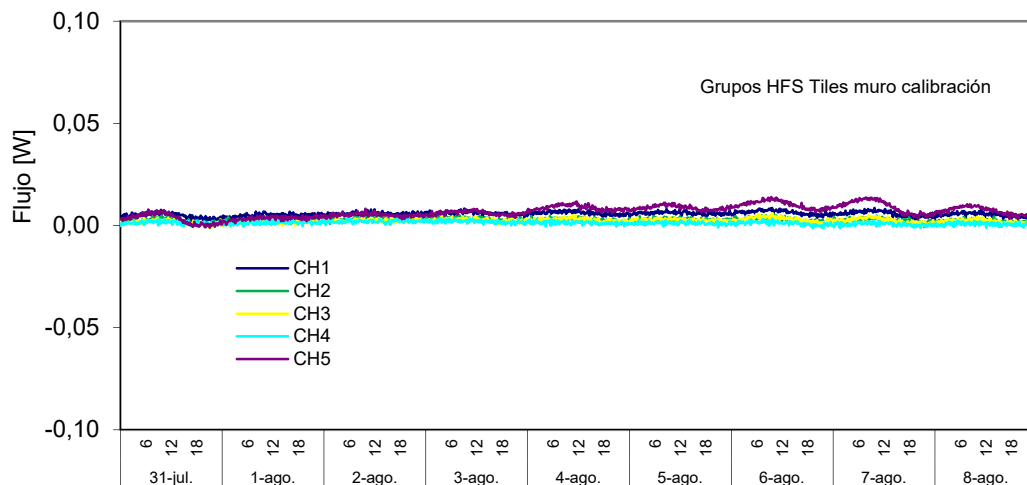


Figura B.3 –Ruido de medida del flujo registrado por las tiles durante el primer ensayo del muro opaco

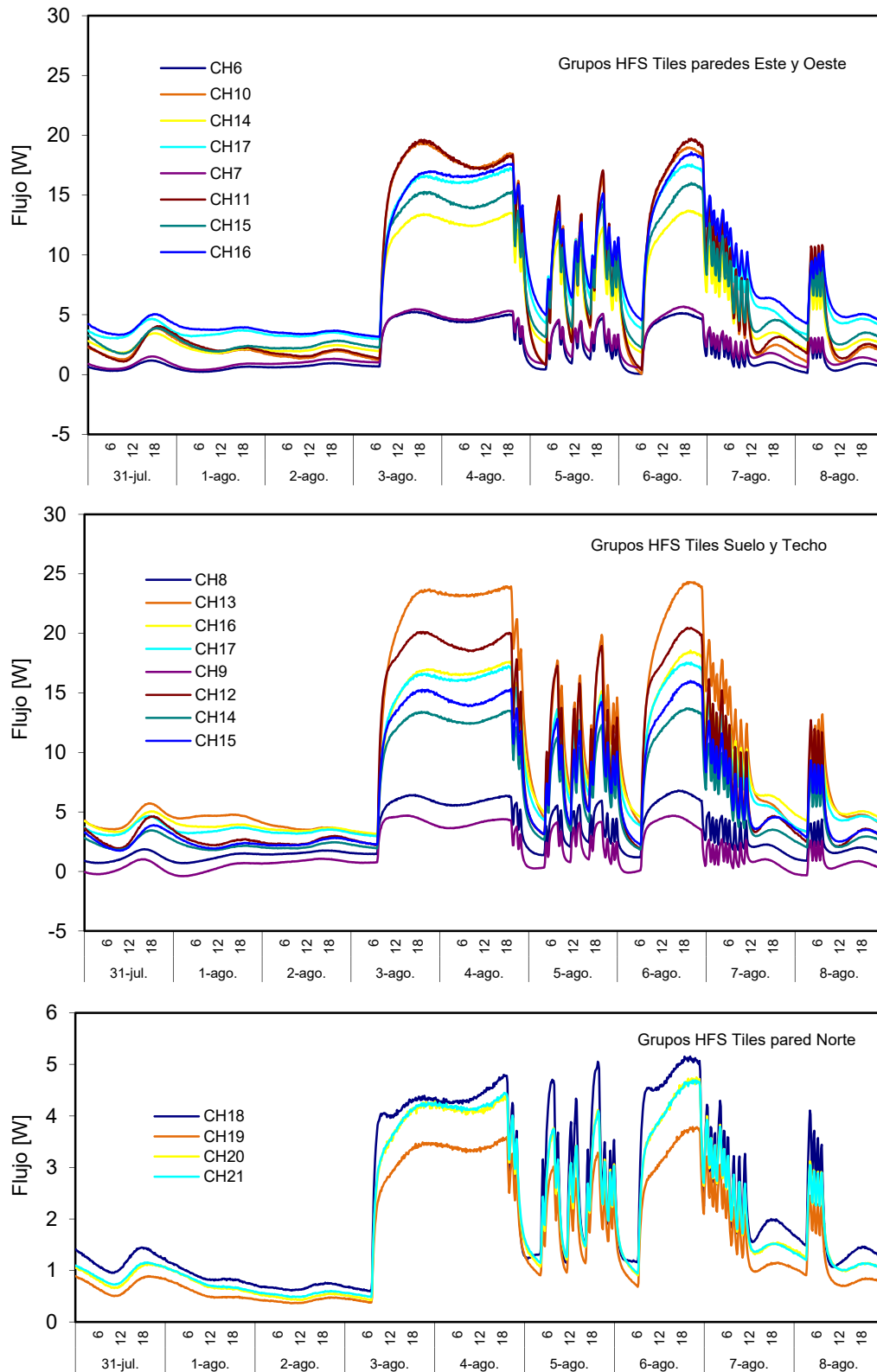


Figura B.4 – Flujos de calor registrados por cada grupo de HFS Tiles durante el primer ensayo del muro opaco

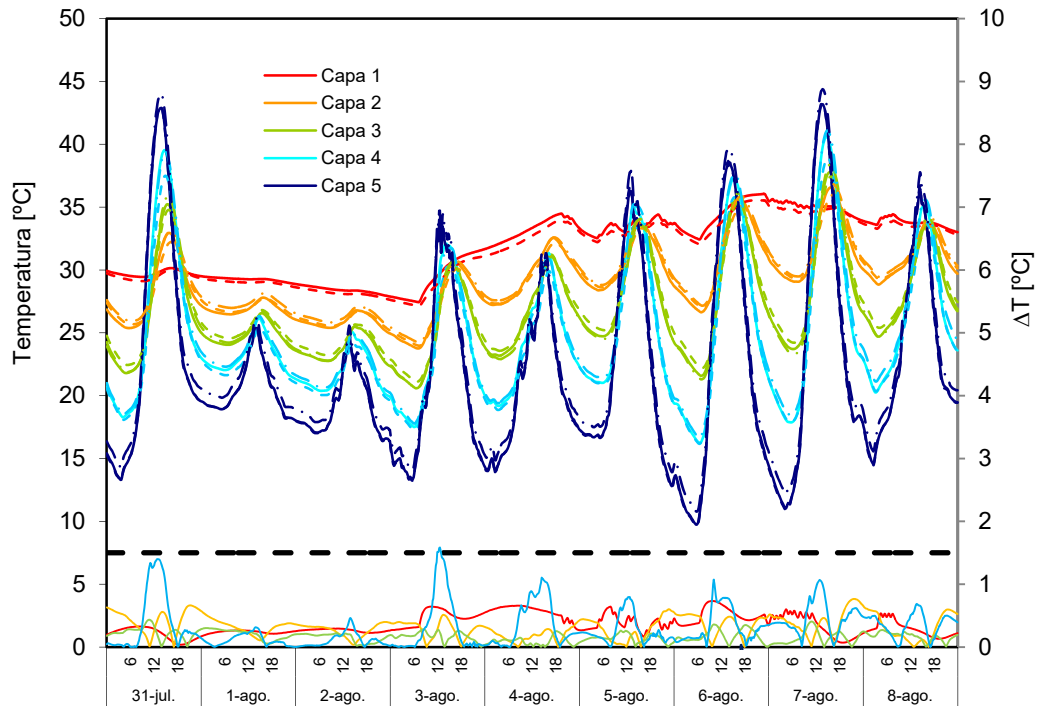


Figura B.5-Evolución de los perfiles de temperatura a lo largo del espesor del muro opaco, para la zona central, lateral y esquina inferior en el primer ensayo

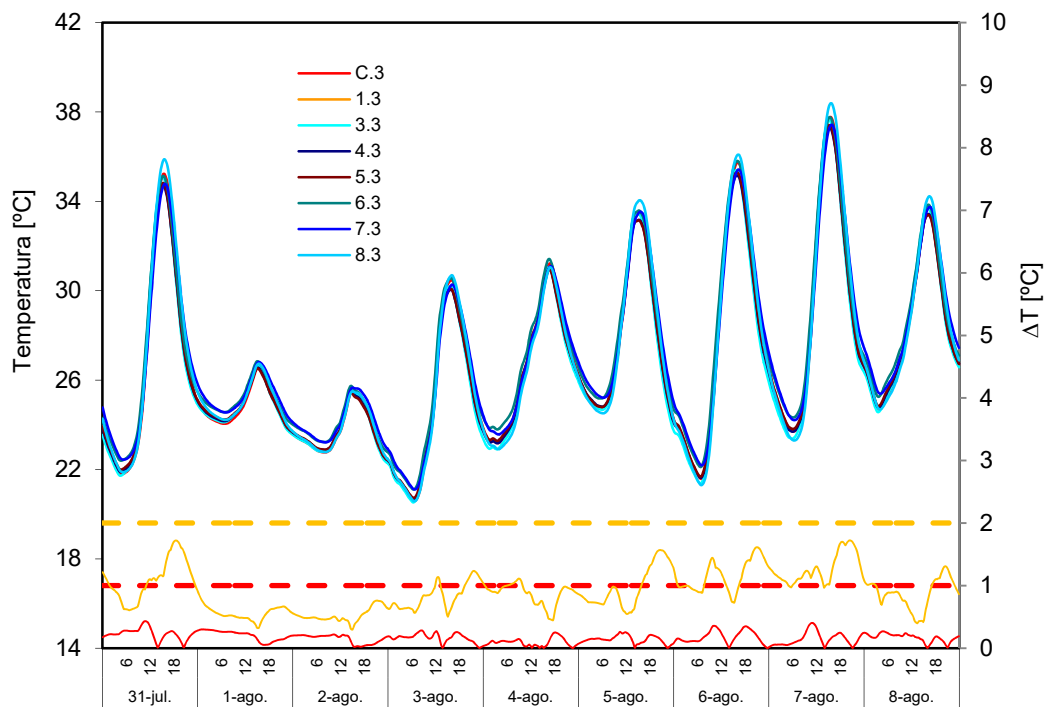


Figura B.6-Evolución de las temperaturas en el plano central del muro opaco para el primer ensayo

En la Figura B.3 se muestra el ruido de medida de las *tiles* junto la cadena de medida del sistema de adquisición. Esta señal de ruido se obtiene puentando los terminales de los grupos correspondientes al muro de calibración que están libres durante el desarrollo de los ensayos normales. Se puede ver que el ruido de medida es muy pequeño, dos

ordenes de magnitud inferior a la señal de flujo media medida. Por lo tanto, la precisión de medida del flujo es elevada. En la Figura B.4 se recogen las señales del total de grupos de *tiles* de la envolvente. Se puede ver que se cumple el chequeo que se indica en la página 155 de la memoria. A continuación se muestran las temperaturas correspondientes a la propia muestra de muro opaco. En la Figura B.5 se muestran los perfiles de temperatura para cada capa de la muestra y en cada uno de los ejes de medida de la muestra que se corresponden con el eje central, la zona de borde y la zona de esquina. En la Figura B.6 se muestran las temperaturas en la capa central de la probeta. En la Figura B.7 y en la Figura B.8 se muestran los flujos puntuales registrados mediante los fluxímetros instalados en el interior y en la superficie del muro opaco.

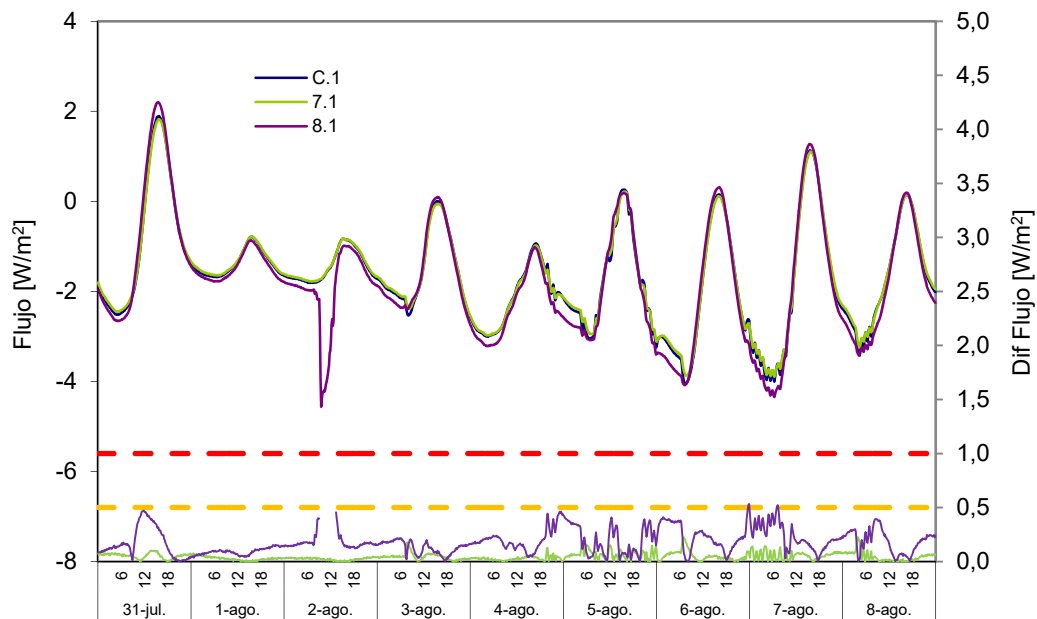


Figura B.7 –Señal de los fluxímetros integrados en la cara interior del muro opaco durante el primer ensayo

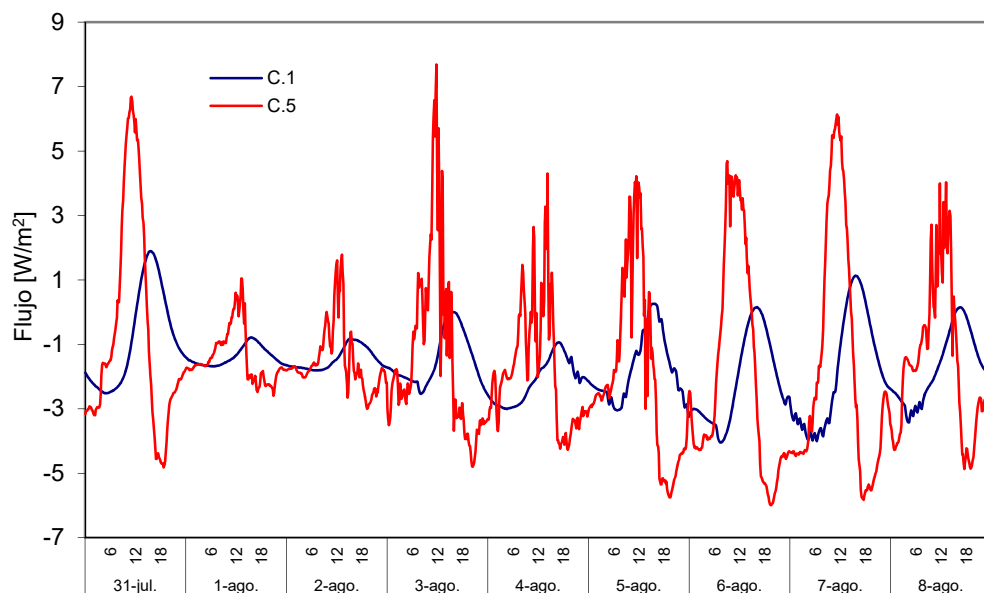


Figura B.8 –Flujos en la zona central del muro opaco en la cara interior y exterior durante el primer ensayo

B.1.2 Segundo componente

En los siguientes apartados se recogen los resultados de la verificación de infiltraciones al inicio y fin de los dos ensayos del muro opaco y los datos de flujos de envolvente en la sala de ensayos y la temperatura de las diferentes capas de la probeta para el muro con la ventana de referencia.

B.1.2.1 Ensayo de infiltraciones

En la Tabla B.2 se indican los valores de renovación de aire que se dan en la sala de ensayos debido a infiltraciones para el componente con la ventana durante los dos periodos de ensayo que se le aplican.

	m_a [ren/h]	
	INICIO	FIN
VENTANA-1	0.139	0.145
VENTANA-2	0.136	0.171

Tabla B.2 – Resultado prueba de infiltraciones para el inicio y fin de los dos ensayos realizados al muro con la ventana

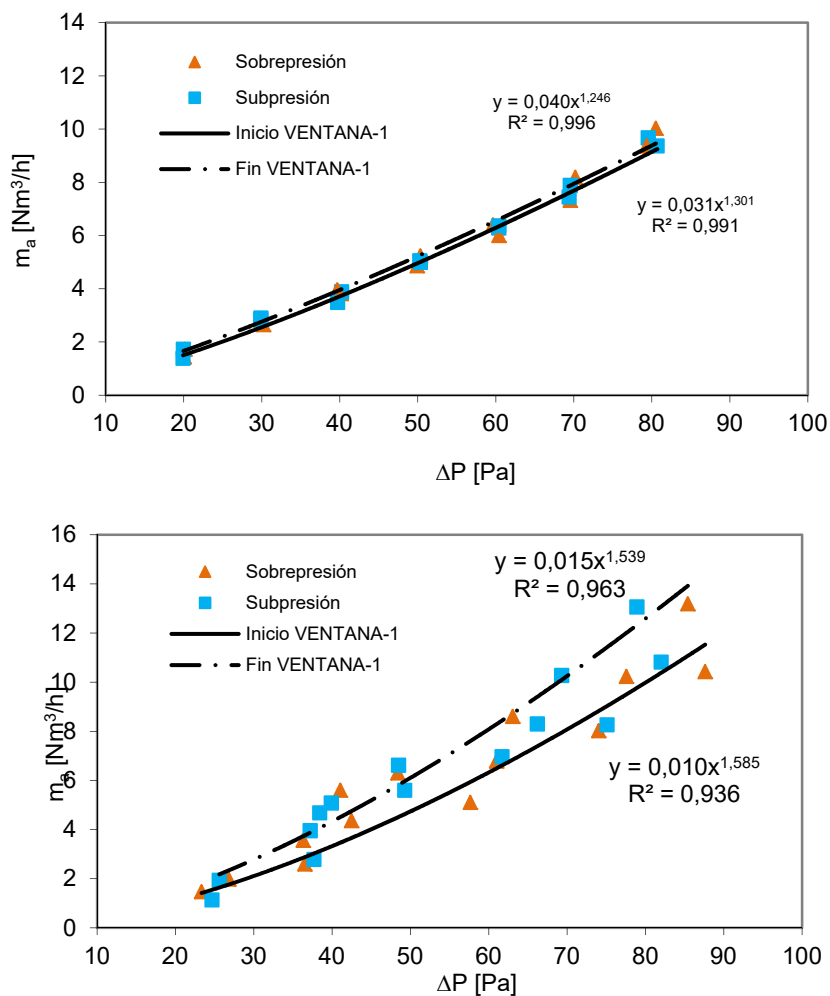


Figura B.9 – Medida de las infiltraciones para el muro con ventana

En la Figura B.9 se muestran los datos de la prueba, la gráfica superior corresponde al primer ensayo y la gráfica inferior al segundo. En el caso del segundo componente se puede ver que las infiltraciones son algo más altas que para el caso del muro opaco. Es de esperar ya que existen más juntas, pero aún así, los valores son reducidos y se mantienen entre el inicio y fin del periodo de estudio.

B.1.2.2 Flujos y temperaturas

A continuación se muestran las medidas de flujo de calor en la envolvente durante el primer ensayo del muro con la ventana.

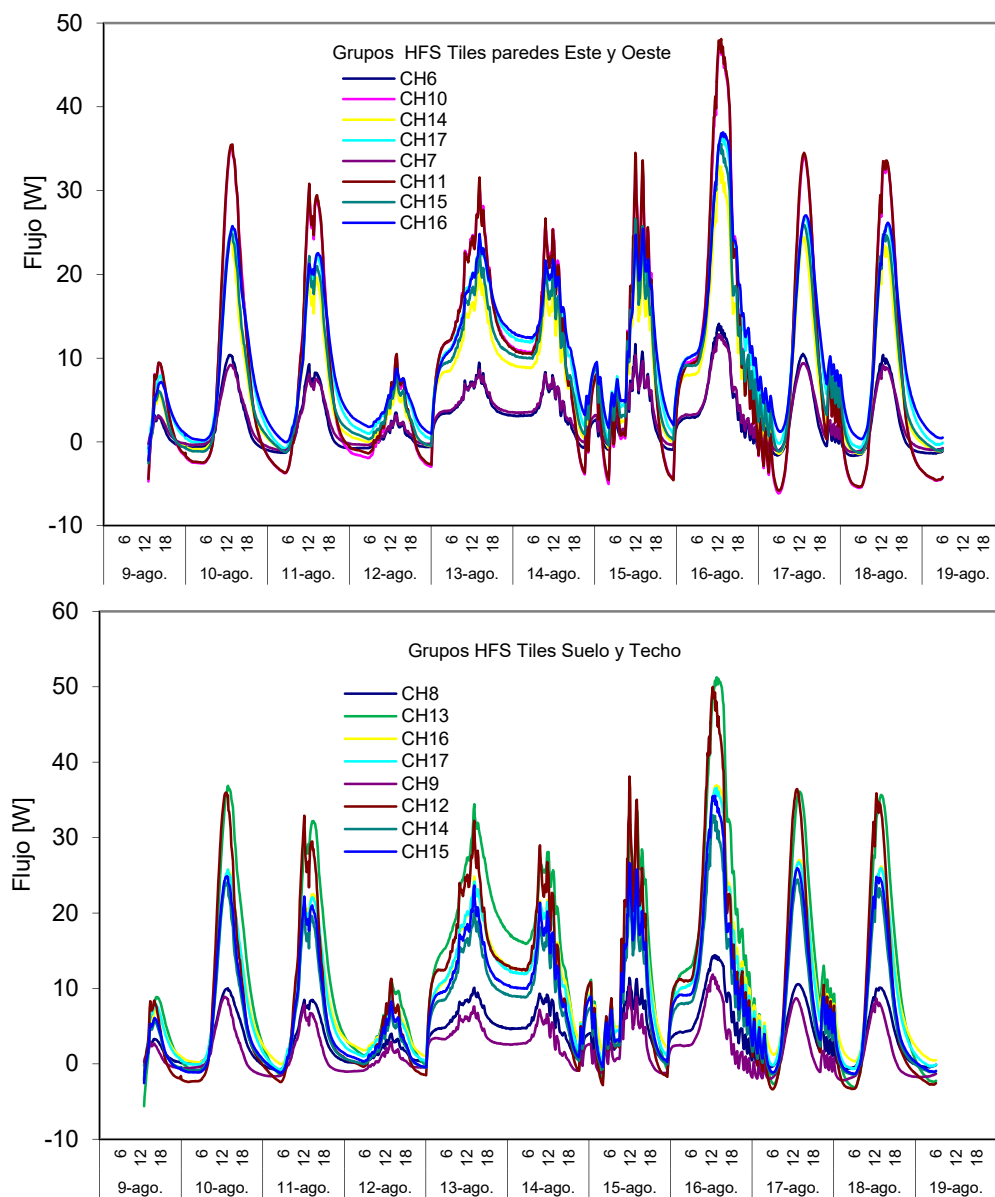


Figura B.10 – Flujos de calor registrados por cada grupo de HFS Tiles durante el primer ensayo del muro con ventana

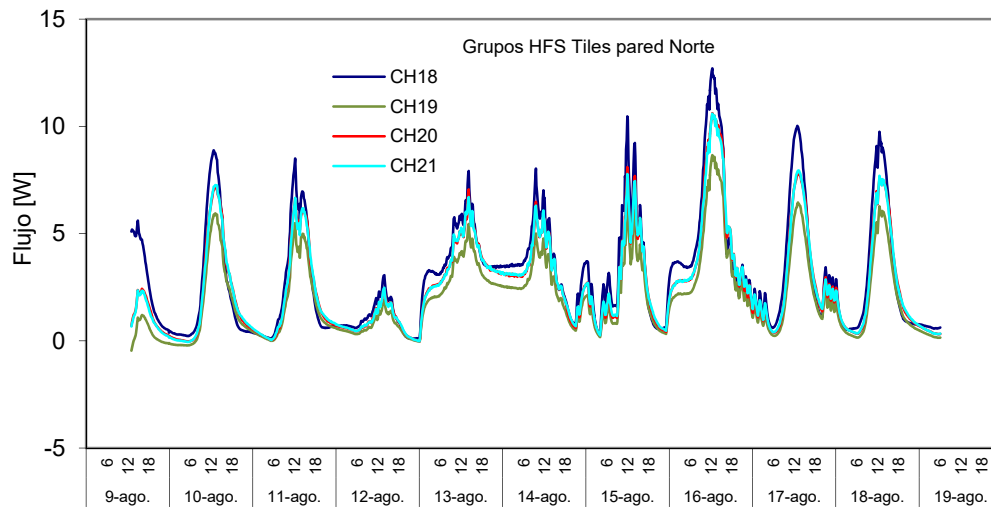


Figura B.11 – Flujos de calor registrados por cada grupo de HFS Tiles durante el primer ensayo del muro con ventana

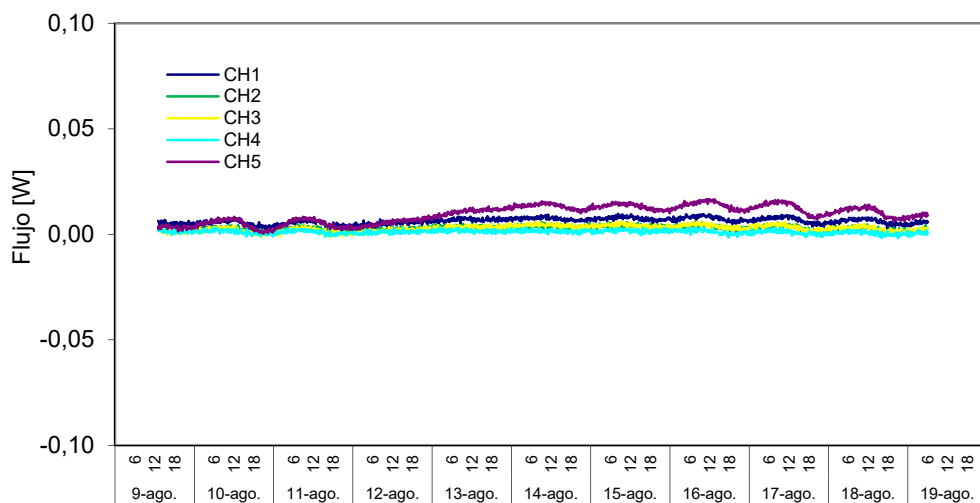


Figura B.12 –Ruido de medida del flujo registrado por las tiles durante el primer ensayo del muro con ventana

En la Figura B10 y en la Figura B.11 se puede ver que los flujos de la envolvente se ven afectados por la ganancia solar que atraviesa la ventana de la probeta, generando un aumento claro del flujo de calor saliente en la sala de ensayos que no está asociado a la rutina de calentamiento. Pero en todos los casos, se mantienen los criterios de comportamiento para grupos equivalentes, por lo que dicha ganancia solar no está afectando a la medida del flujo, gracias a la cortina de apantallamiento que se coloca tras la ventana. En la Figura B.12 se puede ver cómo el ruido de la señal de flujo sigue siendo muy pequeño, aunque sí se puede apreciar el efecto de la radiación solar.

A continuación se muestran las temperaturas correspondientes a la propia muestra de muro con ventana. En la Figura B.13 se recogen las temperatura media registrada por las sondas de aire de la sala de ensayos respecto a la registrada por la sonda de cuerpo negro. Se puede ver que la diferencia entre ambas es siempre inferior a 0,5 °C por lo que no existe un intercambio radiativo representativo dentro de la sala de ensayos, de forma que se puede considerar que la cortina situada tras la ventana del segundo

componente está realizando su función adecuadamente y la medida del flujo de la envolvente es correcta ya que las *tilas* no se ven afectadas por radiación directa. En este primer ensayo del segundo componente no se coloca sonda de temperatura en la cámara de aire entre la ventana y la cortina de protección. Pero analizando los datos, se ve que es interesante disponer de este dato para mejorar el modelo y verificar la eficiencia en la ganancia solar dentro de la sala de ensayos, por lo que se incluye en el conjunto de instrumentación propia de la muestra para el segundo ensayo.

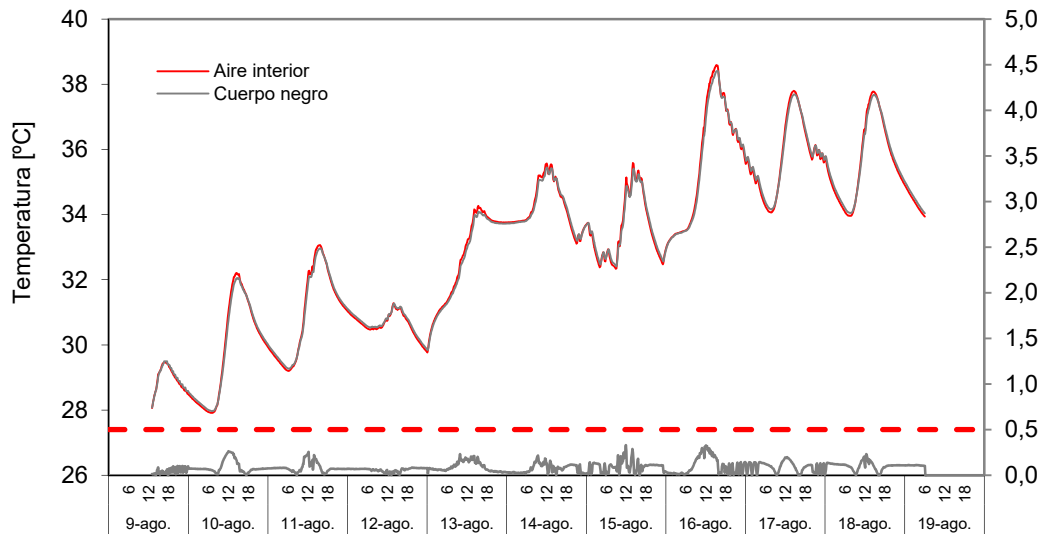


Figura B.13 –Ruido de medida del flujo registrado por las *tilas* durante el primer ensayo del muro con ventana

En la Figura B.14 se muestran las temperaturas registradas por las sondas de superficie instaladas en ambos vidrios de la ventana. En la Figura B.15 se determina la temperatura media del aire de la cámara y el salto de temperaturas entre vidrios, estos dos parámetros determinan el movimiento de convección dentro de dicha cámara y participan de forma determinante en el valor real de transmitancia del componente de ventana, cómo se puede ver en el apartado correspondiente de la memoria.

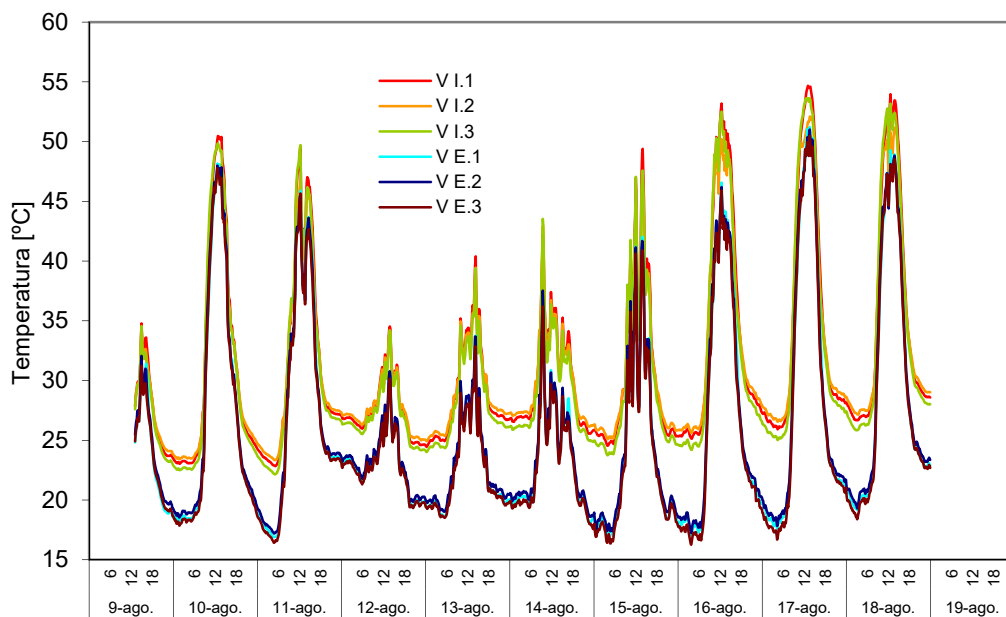


Figura B.14 –Temperaturas en los vidrios de la ventana durante el primer periodo de ensayo

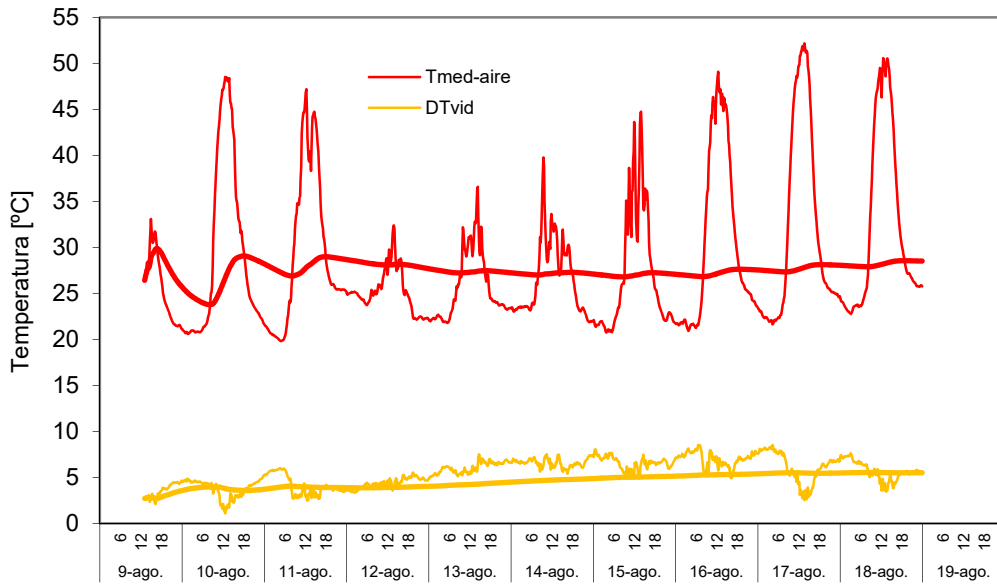


Figura B.15 –Temperaturas media aire cámara y salto de temperatura entre vidrios durante el primer ensayo

En la Figura B.16 se pueden ver los perfiles de temperatura en el anillo perimetral de la muestra para el punto central del lado inferior y para la zona de esquina. Se puede observar como las mayores diferencias entre los dos ejes se producen en las superficies más exteriores. Durante este ensayo la sonda de temperaturas de la zona de esquina en la primera capa dio error de lectura, problema que se repara durante el segundo ensayo.

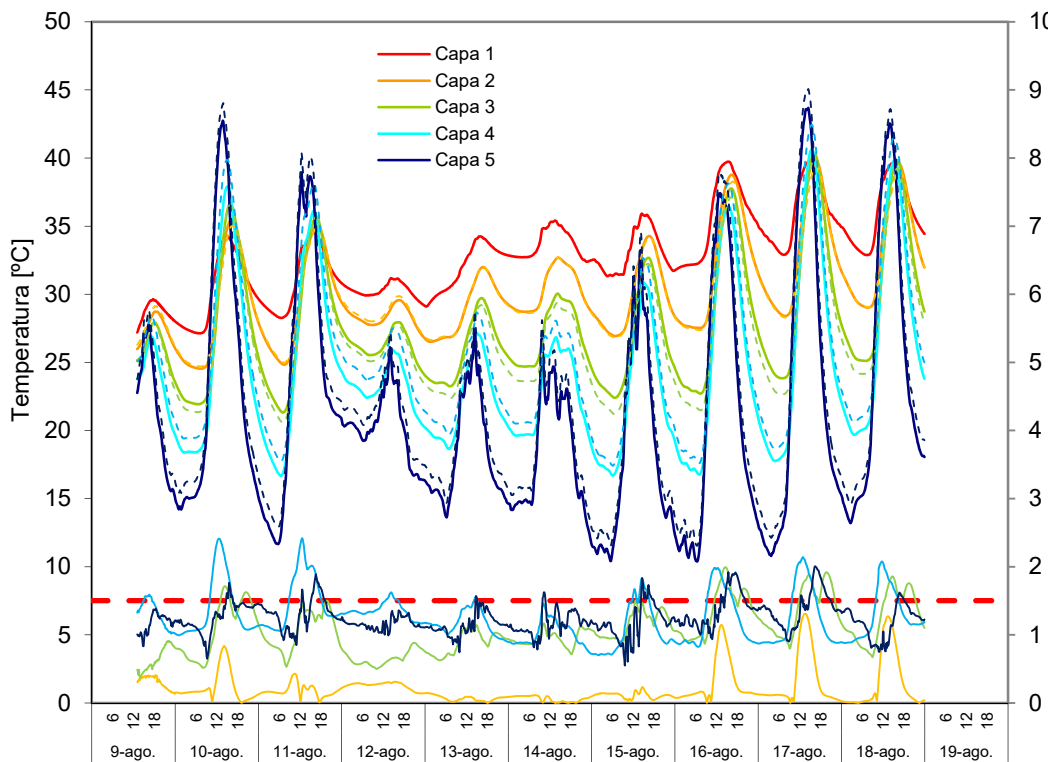


Figura B.16 –Perfiles de temperatura en el anillo perimetral para la zona central y la zona de esquina

Otra forma de cuatificar los efectos de borde es analizar la homogeneidad de temperaturas en la capa central, en la que se dispone de todo el mapa de sondas. Se puede observar que las diferencias medias son inferiores a 1,5°C y este valor no se supera salvo en periodos puntuales y con un margen reducido.

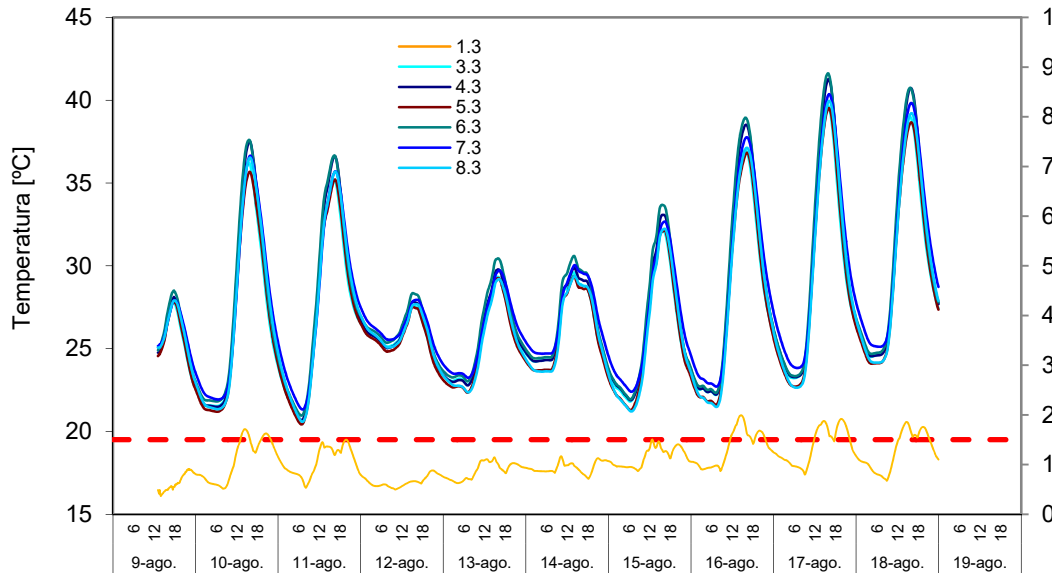


Figura B.17 –Campo temperaturas en la capa central del anillo perimetral de la segunda muestra del IQ-Test

B.2 Modelos matemáticos

Una vez validados los datos experimentales se pasa a trabajar en los modelos de indentificación de parámetros, a continuación se muestran los resultados completos del conjunto de modelos que se han empleado para el análisis de las propiedades térmicas de los dos componentes del ensayo IQ-Test.

B.2.2 Modelos del primer componente

En el proceso de trabajo del ensayo IQ-Test, primero se determinan las propiedades en la zona central del muro opaco y posteriormente se determinan los valores globales de toda la probeta. De forma que se puede restar la conductancia de la zona central al valor completo y calcular la conductancia del anillo perimetral que sirve como base para el estudio del segundo componente.

B.2.2.1 Modelo unidimensional

Para el análisis de la zona central con condiciones de flujo unidimensional se emplea un modelo de segundo orden como el que se muestra en la Figura B.18. Las ecuaciones que lo definen son idénticas a las ya espuestas en [A.17] y [A.18] para los modelos

unidimensionales del muro de calibración. En este caso se emplea un modelo de segundo orden ya que si el muro de calibración, que presenta el doble de espesor que el muro opaco del primer componente del IQ-Test, se representa por un modelo de tercer orden, se considera que con un orden inferior se obtienen resultados fiables, reduciendo el número de parámetros en la identificación.

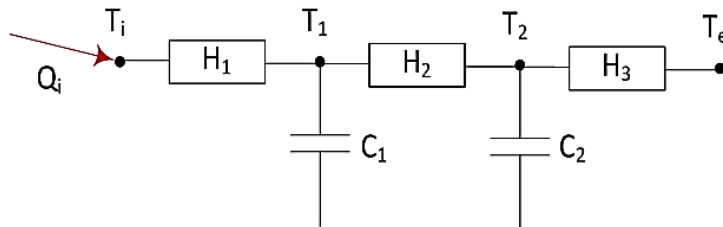


Figura B.18– Modelo segundo orden para la determinación transmitancia del perfil central, U_A , del muro opaco

A continuación se muestran los resultados del proceso de identificación para cada una de los dos periodos de ensayo realizados.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	0.1	1	1000	3.28E-01	2.18E-02	93.861	0	0
H_2	0.1	1	1000	3.38E-01	7.95E-03	11.154	0	-0.0112
C_1	0.5	5	50	4.03E+00	1.55E+00	72.277	0.005	0.0002
C_2	0.5	5	50	9.15E+00	1.51E-01	86.984	0	0
H_3	0.1	1	1000	6.18E+01	1.71E+00	53.698	0.0033	0

Tabla B.3 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para el primer ensayo en la zona centra muro opaco

	H_1	H_2	C_1	C_2	H_3
H_1	1				
H_2	0.432	1			
C_1	0.091	0.343	1		
C_2	0.196	0.333	0.326	1	
H_3	0.161	0.058	0.401	0.094	1

Tabla B.4 – Coeficientes correlación para el primer ensayo en la zona centra muro opaco

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]
T_i	0.2	K	0.001	0.120
T_e	0.5	K	0.002	0.200
Q_i	0.4	W/m ²	0.004	0.480

Tabla B.5 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valor max.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.1	1	1000	2.89E-01	3.84E-03	0.902	0.185	0.880
H ₂	0.1	1	1000	4.39E-01	8.34E-03	0.046	0.387	0.963
C ₁	0.5	5	50	9.47E+00	3.03E-01	0.024	0.368	0.745
C ₂	0.5	5	50	4.01E+00	8.06E-01	0.788	0.636	0.332
H ₃	0.1	1	1000	2.63E+00	2.22E-02	0.903	0.499	0.559

Tabla B.6 – Resultados del proceso de identificación de parámetros para el segundo ensayo zona centra muro opaco

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃
H ₁	1				
H ₂	0.054	1			
C ₁	0.243	0.090	1		
C ₂	0.128	0.421	0.203	1	
H ₃	0.206	0.413	0.153	0.319	1

Tabla B.7 – Coeficientes correlación para el segundo ensayo en la zona centra muro opaco

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]
T _i	0.2	K	0.0012	0.113
T _e	0.5	K	0.0012	0.189
Q _i	0.4	W/m ²	0.0036	0.454

Tabla B.8 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación

En la Tabla B.9 se recogen los valores finales de resistencia y capacidad térmica que se obtienen de los resultados de los modelos de identificación de parámetros. Hay que recordar que en el modelo de identificación de obtienen conductancias y los valores de capacidad térmica están en unidades de C_i [W_{10min}]. Estas son unidades raras de capacidad, pero se obtienen así debido a que el flujo está en [W] y el intervalo de tiempo para el cálculo es de 10 [min].

	R _A [m ² K/W]	C _A [KJ/m ² K]	Residuo [W]
1º ensayo	6,027	7,908	0,17
2º ensayo	6,117	8,090	0,15

Tabla B.9 – Resultados del modelo para el perfil central

Con estos datos y aplicando la propagación de errores se obtienen los resultados finales para la transmitancia del perfil central indicados en la Tabla B.10. Estos resultados son lo que se emplean para el primer estudio del ensayo de interlaboratorios.

	U_A [W/m ² K]	e_{UA} [%]
1º ensayo	0,166	5,3
2º ensayo	0,164	2,9

Tabla B.10 – Resultados finales transmitancia unidimensional U_A para el perfil central del muro opaco

B.2.2.2 Modelo completo

Una vez determinada la transmitancia del eje central, el siguiente dato del interlaboratorios es el cálculo de la transmitancia completa del componente opaco empleando un modelo a escala de celda. El modelo empleado se muestra en la Figura B.19. Las ecuaciones del mismo se indican en [B.1] y [B.2].

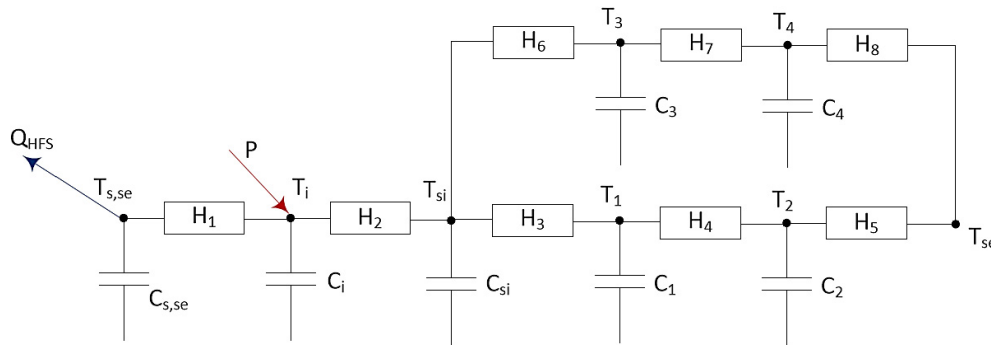


Figura B.19 – Modelo del muro opaco completo con dos ramas para representar el efecto de borde

$$\begin{bmatrix} dT_{s,se} \\ dT_i \\ dT_{si} \\ dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_1}{C_{s,se}} & \frac{H_1}{C_{s,se}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_1}{C_i} & \frac{-(H_1 + H_2)}{C_i} & \frac{H_2}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_{si}} & \frac{-(H_2 + H_3 + H_6)}{C_{si}} & \frac{H_3}{C_{si}} & 0 & \frac{H_6}{C_{si}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_1} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_1} & \frac{H_4}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_2} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_6}{C_3} & 0 & 0 & \frac{-(H_6 + H_7)}{C_3} & \frac{H_7}{C_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_7}{C_4} & \frac{-(H_7 + H_8)}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_{si} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{s,se}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_8}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_{se} \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt \quad [B.1]$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,se}^m \\ T_i^m \\ T_{si}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_{si} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} P \\ Q_{HFS,e} \\ T_{se} \end{bmatrix} + [e] \quad [B.2]$$

En este caso particular se podrían emplear las temperaturas interiores registradas en el componente de muro opaco como funciones de entrada al modelo, de forma que se mejoraría en gran medida la precisión de los resultados. Sin embargo, es complejo que se pueda disponer de esta información en otros ensayos, por lo tanto, se debe determinar las propiedades del componente a través de los datos propios de la celda. A continuación se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H₁	100	300	1000	3.56E+02	4.02E+00	85.7383	0.00016	0.00024
C_{s,se}	500	1000	1500	9.02E+02	2.81E+01	36.2098	0.00012	0.00042
C_i	1	50	200	3.75E+01	2.64E+00	24.7917	0.00037	-0.00035
H₂	10	50	200	6.87E+01	2.31E+00	23.3196	-0.00046	0.00041
C_{si}	1	50	100	4.83E+01	2.67E+01	73.9725	-0.00028	-0.00026
H₃	0.6	1	1000	1.07E+00	2.26E-04	47.3765	-0.00032	0
H₆	0.6	1	1000	2.27E+00	1.35E-01	50.1433	-0.00034	0.00031
C₁	1	250	500	3.80E+01	1.54E+01	96.0384	-0.00015	0
H₄	0.6	1	1000	1.46E+00	4.40E-02	11.8472	-0.00049	-0.00028
C₂	1	250	500	4.02E+01	9.26E+00	31.1362	0.00026	0.00050
H₅	0.6	1	1000	2.20E+01	4.52E-02	98.9031	0	0.00022
C₃	1	250	500	7.42E+01	3.98E+00	2.1728	-0.00029	0.00028
H₇	0.6	1	1000	2.96E+00	8.29E-03	85.7467	-0.00036	-0.00024
C₄	1	250	500	1.28E+02	2.67E+01	84.4039	0	0.00042
H₈	0.6	1	1000	3.01E+01	1.26E-01	80.3147	0.00013	0

Tabla B.11 – Resultados identificación parámetros para 1º ensayo en el modelo completo de muro opaco

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C _{si}	H ₃	H ₆	C ₁	H ₄	C ₂	H ₅	C ₃	H ₇	C ₄	H ₈
H₁	1														
C_{s,se}	0.6	1													
C_i	0.6	0.1	1												
H₂	0.2	0.4	0.1	1											
C_{si}	0.4	0.2	0.2	0.1	1										
H₃	0.6	0.4	0.4	0.6	0.2	1									
H₆	0.6	0.3	0.0	0.5	0.6	0.6	1								
C₁	0.6	0.6	0.3	0.5	0.4	0.1	0.5	1							
H₄	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.5	0.3	0.1	1						
C₂	0.5	0.1	0.1	0.4	0.3	0.0	0.1	0.5	0.4	1					
H₅	0.2	0.1	0.4	0.4	0.2	0.0	0.6	0.0	0.3	0.1	1				
C₃	0.2	0.1	0.2	0.4	0.0	0.1	0.5	0.5	0.4	0.1	0.5	1			
H₇	0.5	0.5	0.5	0.1	0.5	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1		
C₄	0.2	0.1	0.6	0.1	0.4	0.5	0.2	0.1	0.5	0.1	0.3	0.1	0.3	1	
H₈	0.4	0.0	0.4	0.4	0.2	0.5	0.0	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	1

Tabla B.12 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro opaco para 1º ensayo

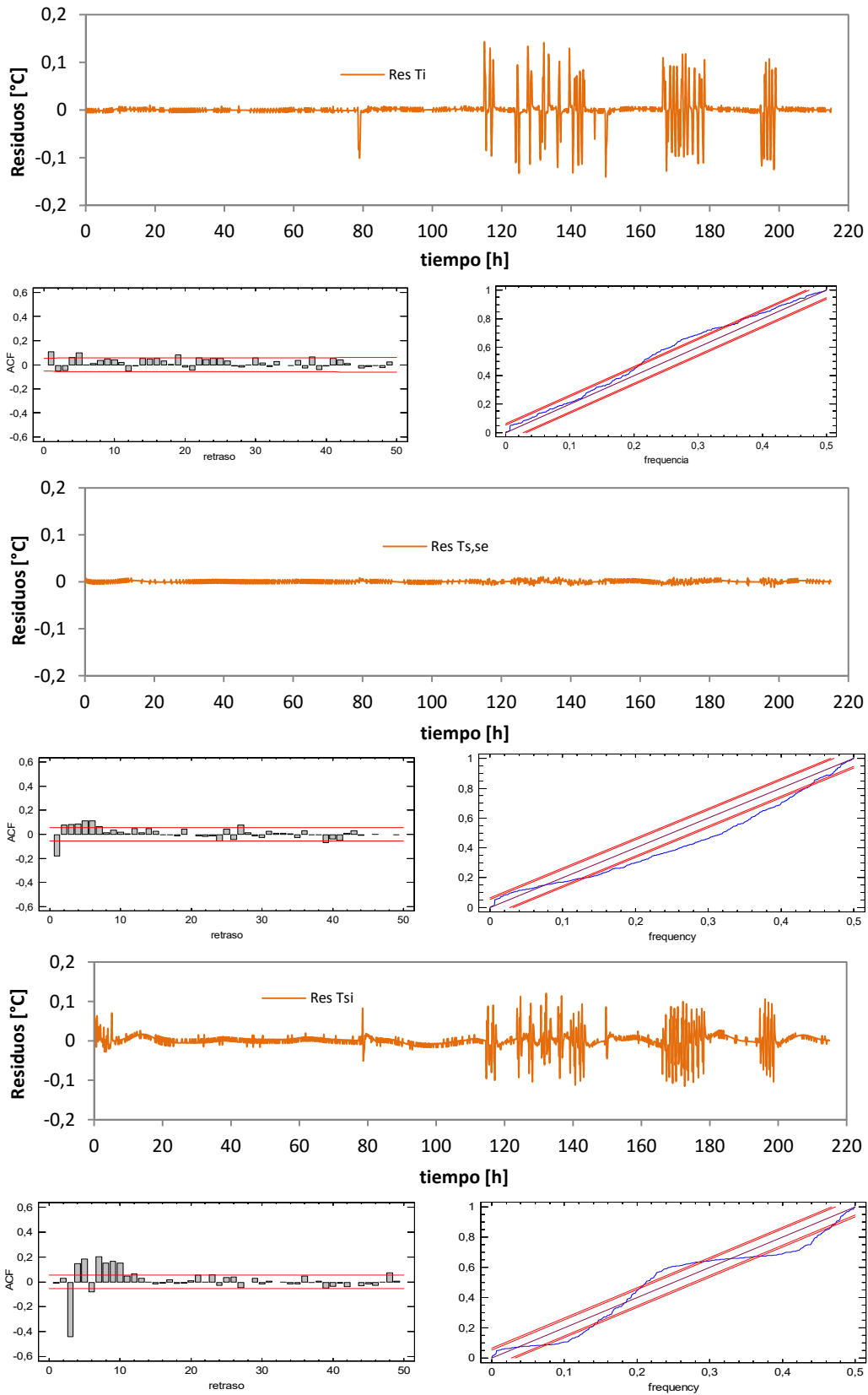


Figura B.20 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro opaco

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	3.47E+02	7.93E+00	16.8653	0.00077	0.00042
C _{s,se}	500	1000	1500	9.24E+02	1.39E+01	11.6812	0.00067	0.00059
C _i	1	50	200	4.88E+01	2.57E+00	37.5728	0.00073	0.00070
H ₂	10	50	200	6.47E+01	3.49E-01	75.2596	0.00079	0.00087
C _{si}	1	50	100	1.03E+02	9.40E+00	24.2198	0.00095	0.00041
H ₃	0.6	1	1000	1.74E+00	6.64E-02	8.6567	0.00020	0
H ₆	0.6	1	1000	2.86E+00	2.69E-03	77.0433	0.00041	0.00029
C ₁	1	250	500	3.11E+01	2.82E+00	94.8852	0.00052	0
H ₄	0.6	1	1000	1.37E+00	9.31E-03	75.9915	0.00018	0.00044
C ₂	1	250	500	5.25E+01	7.96E+00	28.7426	0.00098	0.00085
H ₅	0.6	1	1000	2.16E+02	2.53E+01	19.9403	0	0.00017
C ₃	1	250	500	5.65E+01	4.24E+00	5.3987	0.00068	0.00096
H ₇	0.6	1	1000	1.97E+00	6.51E-02	3.7502	0.00019	0.00045
C ₄	1	250	500	6.27E+01	5.29E+00	37.0835	0	0.00024
H ₈	0.6	1	1000	2.61E+00	2.25E-01	1.9595	0.00004	0

Tabla B.13 – Resultados identificación parámetros para 2º ensayo en el modelo completo de muro opaco

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C _{si}	H ₃	H ₆	C ₁	H ₄	C ₂	H ₅	C ₃	H ₇	C ₄	H ₈
H ₁	1														
C _{s,se}	0.6	1													
C _i	0.3	0.2	1												
H ₂	0.4	0.1	0.5	1											
C _{si}	0.2	0.4	0.6	0.3	1										
H ₃	0.3	0.5	0.1	0.3	0.0	1									
H ₆	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1	0.5	1								
C ₁	0.6	0.3	0.4	0.5	0.2	0.1	0.2	1							
H ₄	0.2	0.5	0.3	0.2	0.0	0.1	0.5	0.4	1						
C ₂	0.5	0.4	0.6	0.1	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	1					
H ₅	0.1	0.2	0.0	0.3	0.6	0.6	0.1	0.2	0.6	0.3	1				
C ₃	0.4	0.3	0.1	0.0	0.5	0.3	0.5	0.2	0.6	0.4	0.2	1			
H ₇	0.4	0.3	0.4	0.0	0.3	0.1	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.4	1		
C ₄	0.4	0.4	0.6	0.6	0.3	0.1	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.4	1	
H ₈	0.6	0.6	0.1	0.3	0.5	0.6	0.3	0.2	0.4	0.1	0.5	0.5	0.0	0.4	1

Tabla B.14 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo muro opaco para 2º ensayo

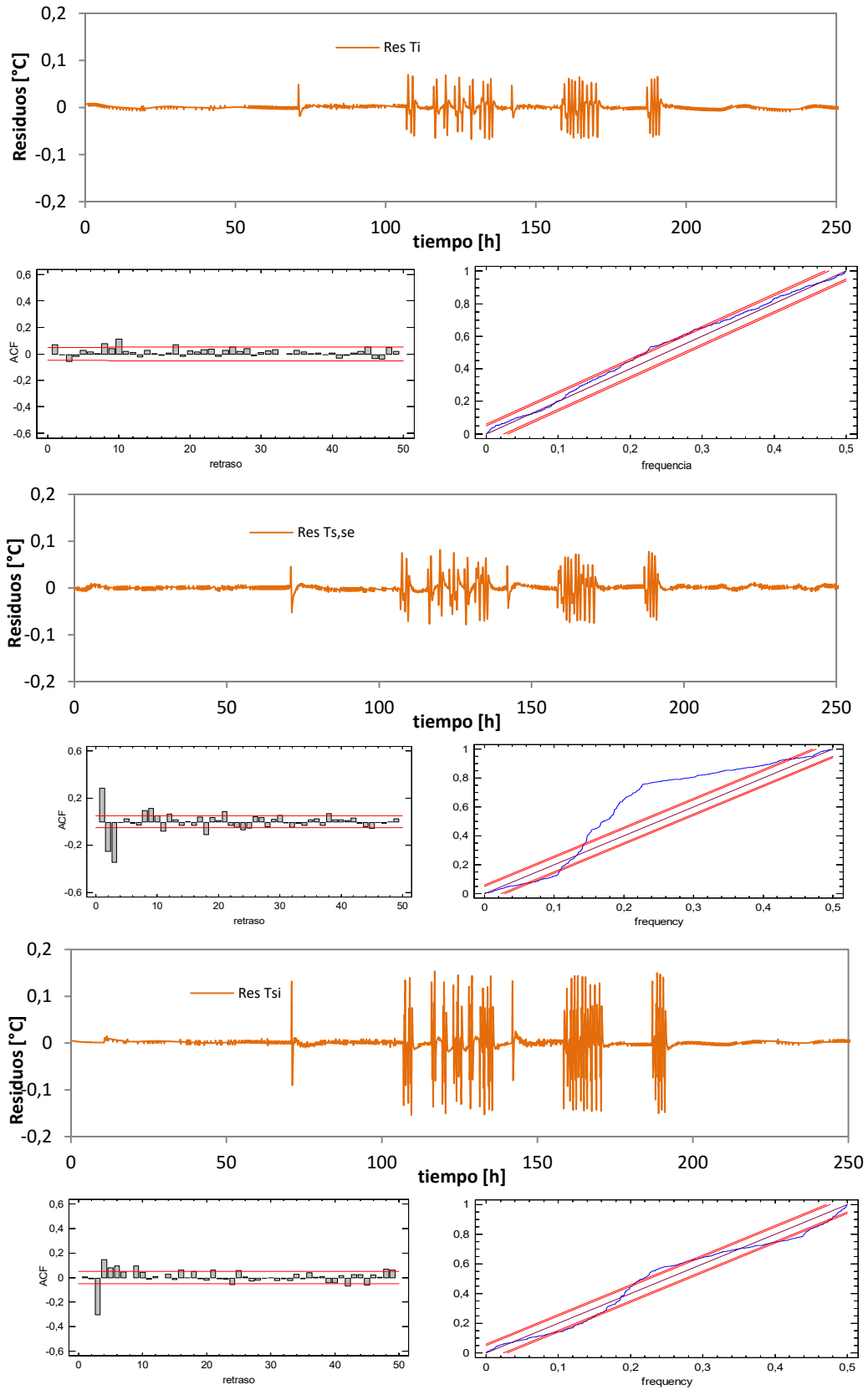


Figura B.21 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro opaco

En base a los resultados obtenidos en los dos modelos de identificación de parámetros se obtienen los valores de propiedades térmicas recogidos en la Tabla B.15.

		RAMA 1	RAMA 2
1º ENSAYO	U [W/K]	0,599	1,231
	C [MJ/K]	0,061	0,136
2º ENSAYO	U [W/K]	0,763	0,806
	C [MJ/K]	0,081	0,102

Tabla B.15 – Valores de conductancias y capacidades térmicas de cada rama del modelo de celda completo para el muro opaco

Con estos datos y aplicando la propagación de incertidumbres, Tabla B.16 y Tabla B.17, del ensayo se obtienen los resultados finales indicados en la Tabla B.18 que corresponden a los valores que se emplean para el estudio de interlaboratorios correspondientes al valor de transmitancia total obtenido de la celda para el muro opaco completo.

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]
Q_{HFS}	1	W	0.008	0.005
p_e	0.3	W	0.002	0.001
T_{se}	0.5	K	0.018	0.011

Tabla B.16 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación para el primer ensayo

variable	u_{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]
Q_{HFS}	1.7	W	0.010	0.008
p_e	0.4	W	0.010	0.001
T_{se}	0.5	K	0.025	0.015

Tabla B.17 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación para el segundo ensayo

	U [W/K]	C [MJ/K]	e_U [%]	e_C [%]
1º ensayo	1,830	0,197	2,8	25,8
2º ensayo	1,569	0,183	3,5	13,4

Tabla B.18 – Resultados del valor de transmitancia *U* y capacidad térmica *C* para el muro opaco completo

En cuanto a la muestra de muro opaco, queda por valorar si la ubicación de la probeta en el portamuestras representa una diferencia efectiva en la interacción con la radiación solar incidente debido a sombras. Para ello se amplía el modelo de celda completo a las funciones de excitación correspondientes a las condiciones exteriores registradas por la sonda de temperatura ventilada y por el solarímetro vertical situado sobre la muestra, ver Figura B.22. Las ecuaciones del modelo se muestran en [B.3] y [B.4].

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	4.56E+02	1.04E+00	57.0485	0	0.00179
C _{s,se}	500	1000	1500	8.19E+02	5.05E+00	66.0263	0.00468	0.00190
C _i	1	50	200	5.59E+01	4.05E+00	77.0987	0	0
H ₂	10	50	200	5.75E+01	9.02E-01	4.8147	-0.00210	0.00173
C _{si}	1	50	100	8.54E+01	5.03E+00	88.2668	-0.00220	0.00275
H ₃	0.6	1	1000	7.73E-01	5.75E-02	23.9228	-0.00424	0
H ₆	0.6	1	1000	2.41E+00	1.55E-01	48.5600	-0.00048	-0.00323
C ₁	1	250	500	3.09E+01	5.51E+00	86.5588	0	-0.00077
H ₄	0.6	1	1000	1.55E+01	1.21E+00	2.0669	0.00455	-0.00059
C ₂	1	250	500	6.21E+01	9.07E+00	10.1520	0	0
H ₅	0.6	1	1000	1.82E+02	5.77E-01	24.7198	0.00467	-0.00343
C ₃	1	250	500	6.57E+01	2.81E+00	28.6418	-0.00198	-0.00445
H ₇	0.6	1	1000	3.12E+00	1.68E-01	58.5331	-0.00443	0.00386
C ₄	1	250	500	9.50E+01	1.84E+01	46.4829	0.00134	0
H ₈	0.6	1	1000	5.55E+00	1.22E+00	97.8623	0.00187	-0.00188
H _e	10	150	500	1.26E+02	6.18E+00	94.9916	-0.00330	0
A ₁	0.1	3	7	1.95E+00	4.42E-01	37.8222	0.00166	0.00301

Tabla B.19 – Resultados identificación parámetros para 1º ensayo en el modelo completo de muro opaco con las variables de ambiente exterior

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C _{si}	H ₃	H ₆	C ₁	H ₄	C ₂	H ₅	C ₃	H ₇	C ₄	H ₈	H _e	A ₁
H ₁	1																
C _{s,se}	0.1	1															
C _i	0.4	0.3	1														
H ₂	0.7	0.5	0.7	1													
C _{si}	0.8	0.7	0.8	0.2	1												
H ₃	0.1	0.3	0.2	0.5	0.0	1											
H ₆	0.2	0.7	0.3	0.7	0.8	0.6	1										
C ₁	0.4	0.9	0.1	0.1	0.5	0.2	0.7	1									
H ₄	0.3	0.9	0.2	0.7	0.5	0.9	0.3	0.2	1								
C ₂	0.3	0.3	0.2	0.4	0.5	0.9	0.1	0.8	0.1	1							
H ₅	0.3	0.4	0.2	0.0	0.3	0.6	0.4	0.0	0.2	0.3	1						
C ₃	0.1	0.4	0.2	0.7	0.8	0.4	0.6	0.7	0.4	0.1	0.3	1					
H ₇	0.5	0.4	0.1	0.9	0.2	0.2	0.8	0.3	0.2	0.6	0.5	0.8	1				
C ₄	0.2	0.3	0.3	0.0	0.3	0.7	0.4	0.5	0.3	0.5	0.8	0.9	0.3	1			
H ₈	0.1	0.8	0.1	0.6	0.4	0.9	0.3	0.4	0.5	0.3	0.8	0.7	0.5	0.2	1		
H _e	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.1	0.6	0.3	0.4	0.0	0.3	0.2	0.0	0.8	1	
A ₁	0.7	0.3	0.8	0.1	0.6	0.1	0.4	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	0.4	0.1	0.2	0.7	1

Tabla B.20 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo exterior del muro opaco para 1º ensayo

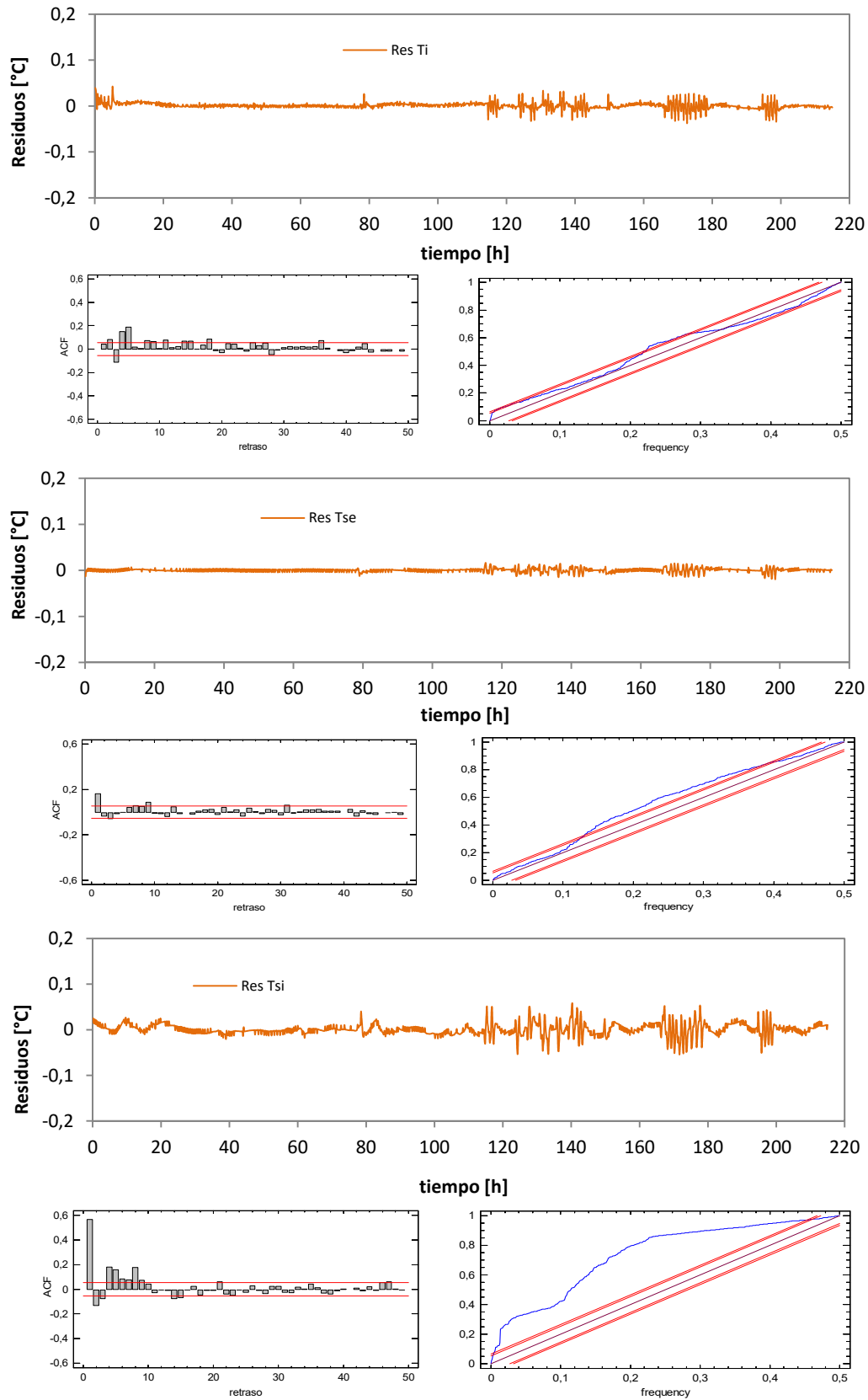


Figura B.23 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro opaco con condiciones exteriores

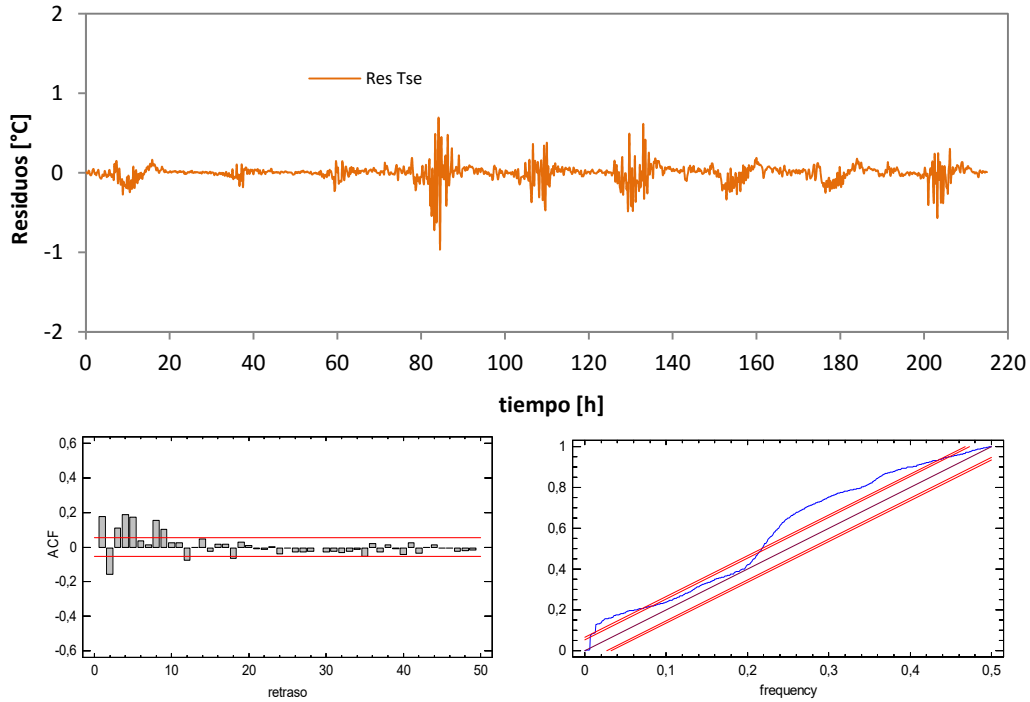


Figura B.24 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro opaco con condiciones exteriores

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	2.90E+02	3.67E+01	87.2623	-0.00149	0.00461
C _{s,se}	500	1000	1500	8.91E+02	8.96E+01	38.6521	0.00352	-0.00361
C ₁	1	50	200	6.54E+01	9.96E+00	83.2884	0	-0.00446
H ₂	10	50	200	6.23E+01	6.99E+00	25.9227	-0.00413	0
C _{si}	1	50	100	8.96E+01	1.43E+01	4.2742	0.00269	0.00411
H ₃	0.6	1	1000	6.44E+00	1.24E-01	8.6494	0.00366	0
H ₆	0.6	1	1000	3.27E+00	4.18E-01	32.4600	0	-0.00228
C ₁	1	250	500	4.22E+01	1.79E+00	78.2838	-0.00394	0.00069
H ₄	0.6	1	1000	1.32E+00	7.90E-02	52.9734	0.00177	0
C ₂	1	250	500	8.25E+01	1.62E+01	91.5313	0	0.00242
H ₅	0.6	1	1000	4.52E+00	1.61E-01	29.7900	0.00360	-0.00441
C ₃	1	250	500	2.86E+01	2.02E+00	52.4876	0	0
H ₇	0.6	1	1000	8.57E-01	1.35E-01	11.9653	-0.00285	0.00361
C ₄	1	250	500	7.04E+01	1.84E+01	84.8449	-0.00463	-0.00230
H ₈	0.6	1	1000	7.45E+01	3.13E+00	58.0730	0	0.00472
H _e	10	150	500	1.01E+02	6.97E+00	22.0486	0	0.00478
A ₁	0.1	3	7	2.04E+00	5.23E-01	1.4947	0.00065	0.00447

Tabla B.21 – Resultados identificación parámetros para 2º ensayo en el modelo completo de muro opaco con las variables de ambiente exterior

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C _{si}	H ₃	H ₆	C ₁	H ₄	C ₂	H ₅	C ₃	H ₇	C ₄	H ₈	H _e	A ₁
H ₁	1																
C _{s,se}	0.7	1															
C _i	0.6	0.5	1														
H ₂	0.2	0.1	0.7	1													
C _{si}	0.3	0.1	0.1	0.9	1												
H ₃	0.2	0.9	0.8	0.8	0.3	1											
H ₆	0.6	0.7	0.1	0.4	0.2	0.5	1										
C ₁	0.6	0.0	0.7	0.7	0.2	0.3	0.5	1									
H ₄	0.0	0.9	0.8	0.2	0.2	0.7	0.8	0.6	1								
C ₂	0.9	0.8	0.4	0.9	0.6	0.5	0.4	0.6	0.0	1							
H ₅	0.3	0.8	0.4	0.0	0.8	0.9	0.6	0.9	0.5	0.5	1						
C ₃	0.2	0.9	0.2	0.4	0.3	0.8	0.1	0.6	0.8	0.5	0.9	1					
H ₇	0.2	0.5	0.2	0.1	0.1	0.7	0.2	0.3	0.2	0.6	0.0	0.4	1				
C ₄	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.6	0.7	0.1	0.0	0.8	0.7	0.3	1			
H ₈	0.4	0.6	0.4	0.9	0.4	0.2	0.5	0.5	0.7	0.7	0.1	0.2	0.9	0.8	1		
H _e	0.5	0.2	0.3	0.5	0.0	0.8	0.8	0.8	0.2	0.7	0.6	0.1	0.3	0.8	0.4	1	
A ₁	0.7	0.7	0.6	0.2	0.8	0.1	0.4	0.7	0.7	0.3	0.6	0.5	0.3	0.8	0.4	0.0	1

Tabla B.22 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo exterior del muro opaco para 2º ensayo

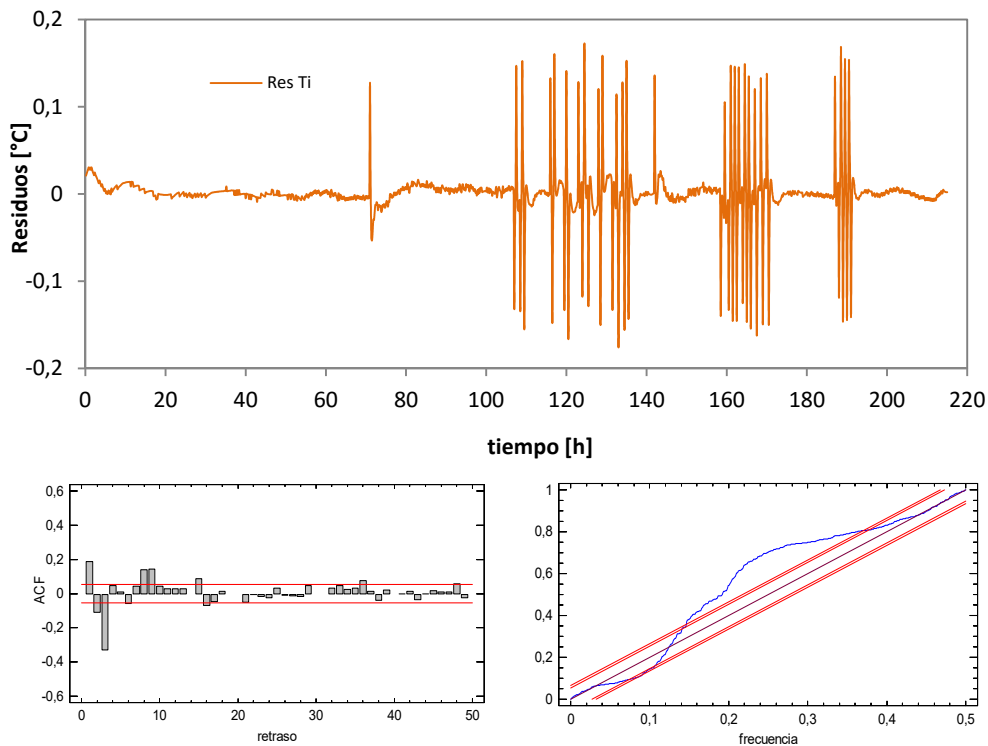


Figura B.25 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro opaco con condiciones exteriores

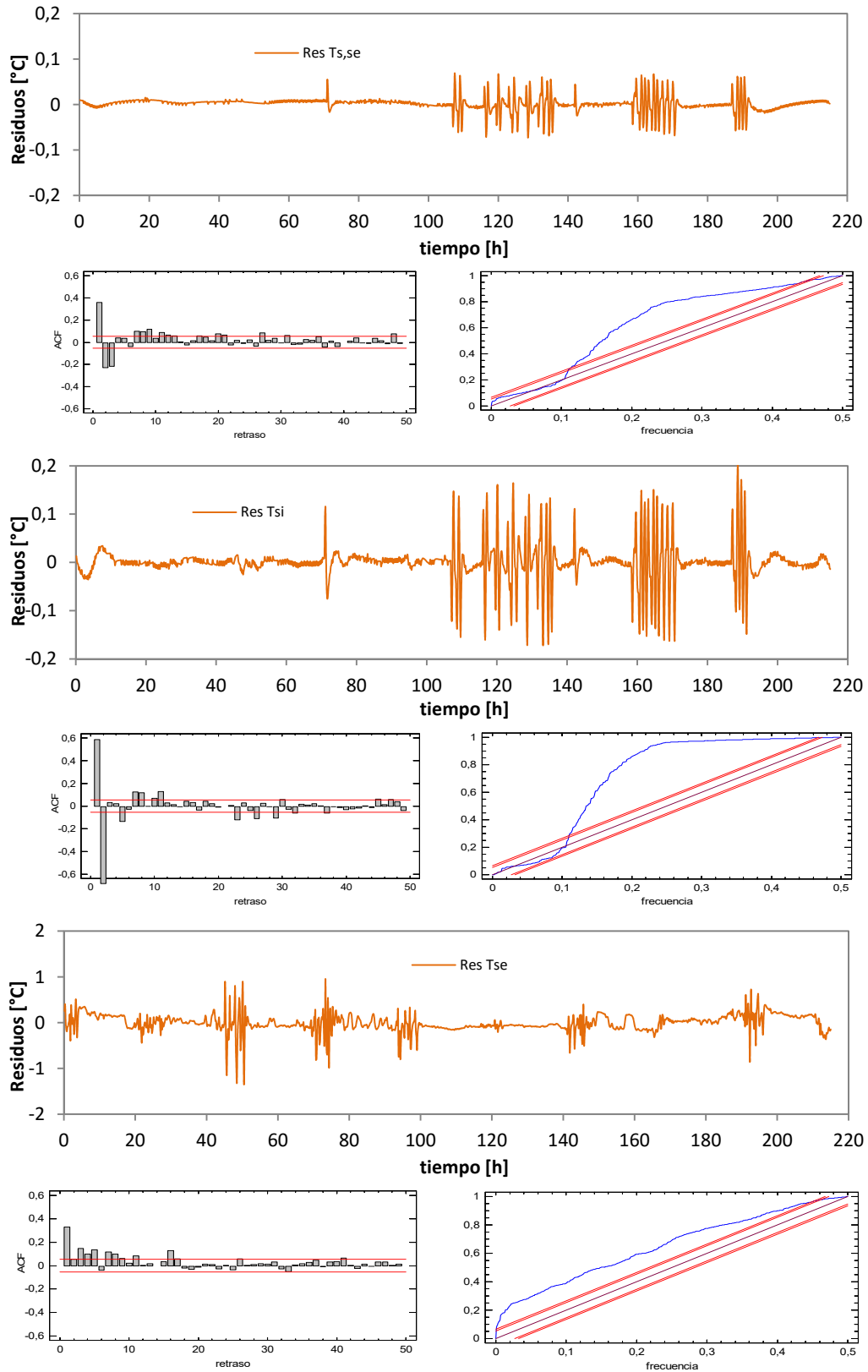


Figura B.26 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro opaco con condiciones exteriores

Con los resultados de los modelos que contemplan las condiciones de temperatura exterior y radiación solar se obtienen los datos mostrados en la Tabla B.23. Se puede concluir que la colocación de la muestra en el portaprobetas no es representativa de cara a efectos de ganancia solar o de coeficiente de transmisión de calor por convección.

	H_e [W/K]	h_e [W/m ² K]	A_{Gv} [m ²]	A_{Gv} [-]
1º ENSAYO	121.6	16.82	1.947	0.269
2º ENSAYO	101.1	13.98	2.042	0.282

Tabla B.23 – Parámetros del intercambio de calor de la superficie del muro opaco con el ambiente exterior

B.2.3 Modelos del segundo componente

Una vez caracterizado el primer componente, se retira la zona central del muro opaco y se sustituye por la ventana de referencia. La colocación de dicha ventana esta definida con precisión en las norma del ensayo interlaboratorios de forma que los efectos de borde seán similares entre centros participantes. A continuación se desarrollan los modelos de identificación de parámetros empleados en el estudio del segundo componente y los resultados que se obtienen.

Modelo simple

El modelo más simple que representa el segundo componente es el que se muestra en la Figura B.27, y cuyas ecuaciones se indican en [B.4] y [B.5].

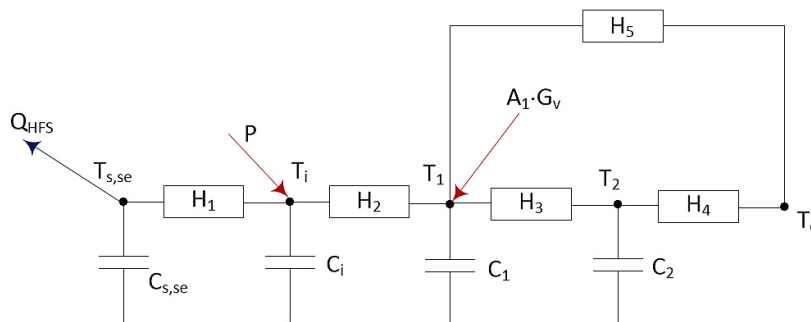


Figura B.27 – Modelo simple de la segunda muestra del IQ-Test

$$\begin{bmatrix} dT_{s,se} \\ dT_i \\ dT_1 \\ dT_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_1}{C_{s,se}} & \frac{H_1}{C_{s,se}} & 0 & 0 \\ \frac{H_1}{C_i} & -(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_i} & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & -(H_2 + H_3 + H_5) & \frac{H_3}{C_1} \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_2} & -(H_3 + H_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_1}{C_1} & \frac{H_5}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ G_v \\ T_e \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt \quad [B.4]$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,se}^m \\ T_i^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ G_v \\ T_e \end{bmatrix} + [e] \quad [B.5]$$

En este caso se representa reproducen las dos partes de la muestra, muro perimetral mediante una rama con inercia térmica, y la ventana mediante un sola conductancia y sin inercia térmica. La ganancia solar se linca a un nodo interior de la sala de ensayos diferente al nodo de temperatura medida, ya que corresponde con la temperatura del aire en la cámara que se genera entre la cortina y la superficie de la muestra, ya que corresponde con la zona en la que se produce realmente esa entrada directa de flujo y, además, presenta unos coeficiente de convección diferentes a los del resto de superficies de la sala de ensayos. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada periodo de enayo realizado. Se puede observar que los ajustes a ruido blanco no son muy buenos, por lo que el modelo, aunque aproximado, ya que los resultados si son muy cercanos a los valores finales, no reproduce por completo el comportamiento real del componente y, por tanto, exige un aumento en su definición.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H₁	100	300	1000	5.68E+02	5.77E+00	68.2549	-0.0044	-0.0046
C_{s,se}	500	1000	1500	9.78E+02	5.61E+01	95.4879	-0.0013	-0.0015
C_i	1	50	200	8.34E+01	6.00E+00	43.4769	0	0.0043
H₂	10	50	200	7.58E+01	7.18E-01	44.9105	0.0047	-0.0019
C₁	1	50	100	1.82E+01	2.58E+00	24.1541	-0.0009	0.0015
H₃	0.6	1	1000	3.45E+00	4.64E-01	93.7100	0	0.0040
H₅	0.6	1	1000	5.21E+00	5.63E-01	80.0091	0.0027	0
C₂	1	250	500	2.74E+02	3.38E+01	87.1255	0	0.0046
H₄	0.6	1	1000	2.61E+00	1.41E-01	54.7450	0.0014	0.0049
A₁	0.1	1	1.8	1.49E+00	9.46E-02	22.8934	0.0040	0

Tabla B.24 – Resultados identificación parámetros para 1º ensayo en el modelo simple del muro con ventana

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C ₁	H ₃	H ₅	C ₂	H ₄	A ₁
H₁	1									
C_{s,se}	0.21	1								
C_i	0.31	0.55	1							
H₂	0.22	0.02	0.47	1						
C₁	0.46	0.23	0.37	0.38	1					
H₃	0.56	0.43	0.22	0.43	0.54	1				
H₅	0.26	0.59	0.15	0.36	0.07	0.13	1			
C₂	0.17	0.01	0.08	0.60	0.39	0.23	0.48	1		
H₄	0.26	0.05	0.24	0.01	0.32	0.04	0.50	0.10	1	
A₁	0.14	0.37	0.13	0.03	0.46	0.42	0.18	0.48	0.08	1

Tabla B.25 – Coeficientes de correlación parámetros modelo simple del muro con ventana para 1º ensayo

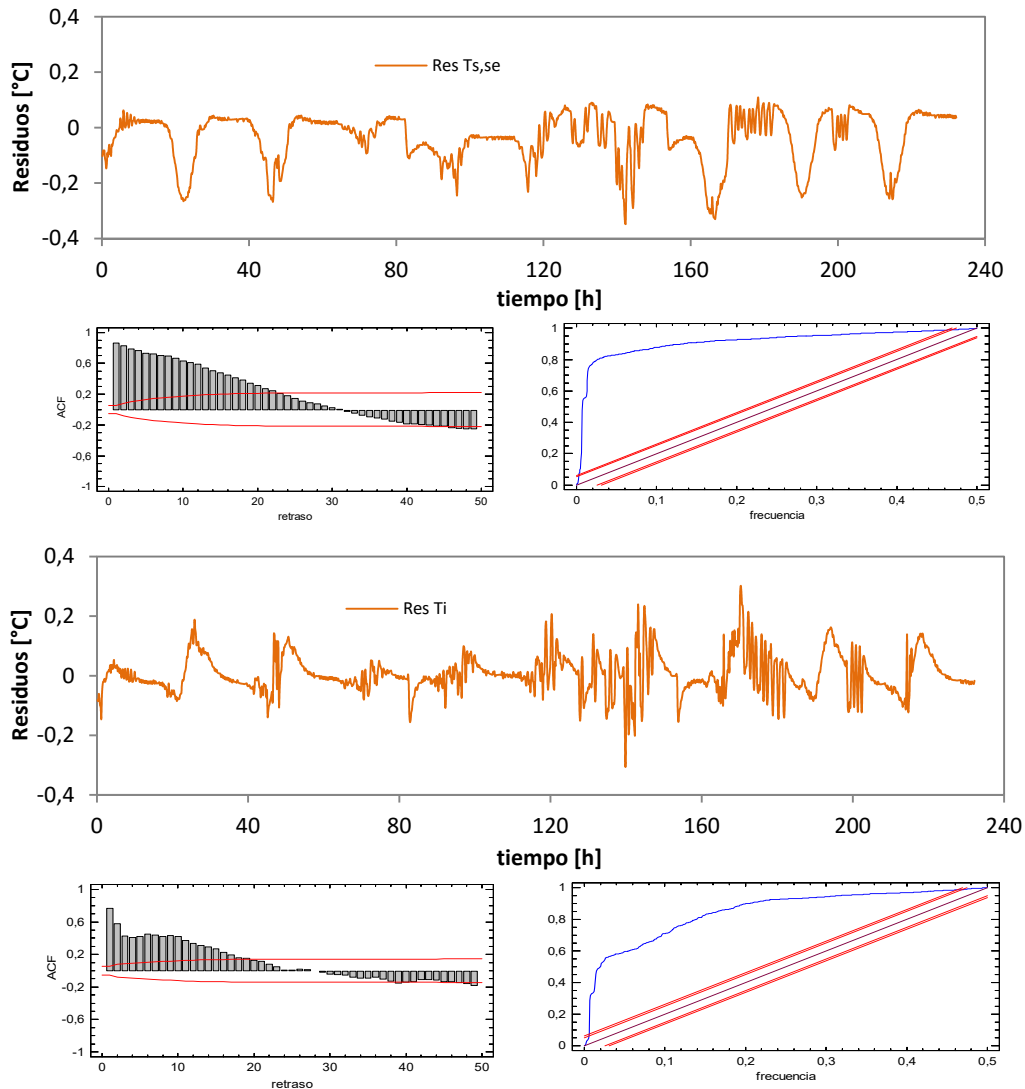


Figura B.28 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro con ventana en el modelo simple

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H_1	100	300	1000	3.86E+02	6.22E+01	47.8255	0.0015	0.0020
$C_{s,se}$	500	1000	1500	9.81E+02	6.04E+01	26.6858	0.0045	0.0027
C_1	1	50	200	3.90E+01	5.02E-01	52.4892	-0.0015	0.0026
H_2	10	50	200	4.95E+01	6.87E-01	86.7224	-0.0043	0.0042
C_1	1	50	100	6.63E+01	6.91E+00	70.6388	0.0048	-0.0048
H_3	0.6	1	1000	2.25E+00	2.50E-01	48.1325	0.0040	0
H_5	0.6	1	1000	4.93E+00	6.49E-01	14.1684	-0.0019	0
C_2	1	250	500	2.27E+02	3.67E+01	31.3701	0	0.0034
H_4	0.6	1	1000	3.54E+00	3.24E-01	11.7806	-0.0033	0.0025
A_1	0.1	1	1.8	1.15E+00	3.63E-02	62.2355	-0.0014	0

Tabla B.26 – Resultados identificación parámetros para 2º ensayo en el modelo simple del muro con ventana

	H_1	$C_{s,se}$	C_i	H_2	C_1	H_3	H_5	C_2	H_4	A_1
H_1	1									
$C_{s,se}$	0.19	1								
C_i	0.47	0.00	1							
H_2	0.33	0.41	0.54	1						
C_1	0.33	0.24	0.56	0.49	1					
H_3	0.04	0.36	0.25	0.31	0.07	1				
H_5	0.17	0.12	0.17	0.32	0.36	0.21	1			
C_2	0.60	0.23	0.03	0.32	0.27	0.05	0.27	1		
H_4	0.29	0.43	0.37	0.08	0.17	0.25	0.18	0.26	1	
A_1	0.05	0.13	0.27	0.10	0.09	0.41	0.60	0.59	0.46	1

Tabla B.27 – Coeficientes de correlación parámetros modelo simple del muro con ventana para 2º ensayo

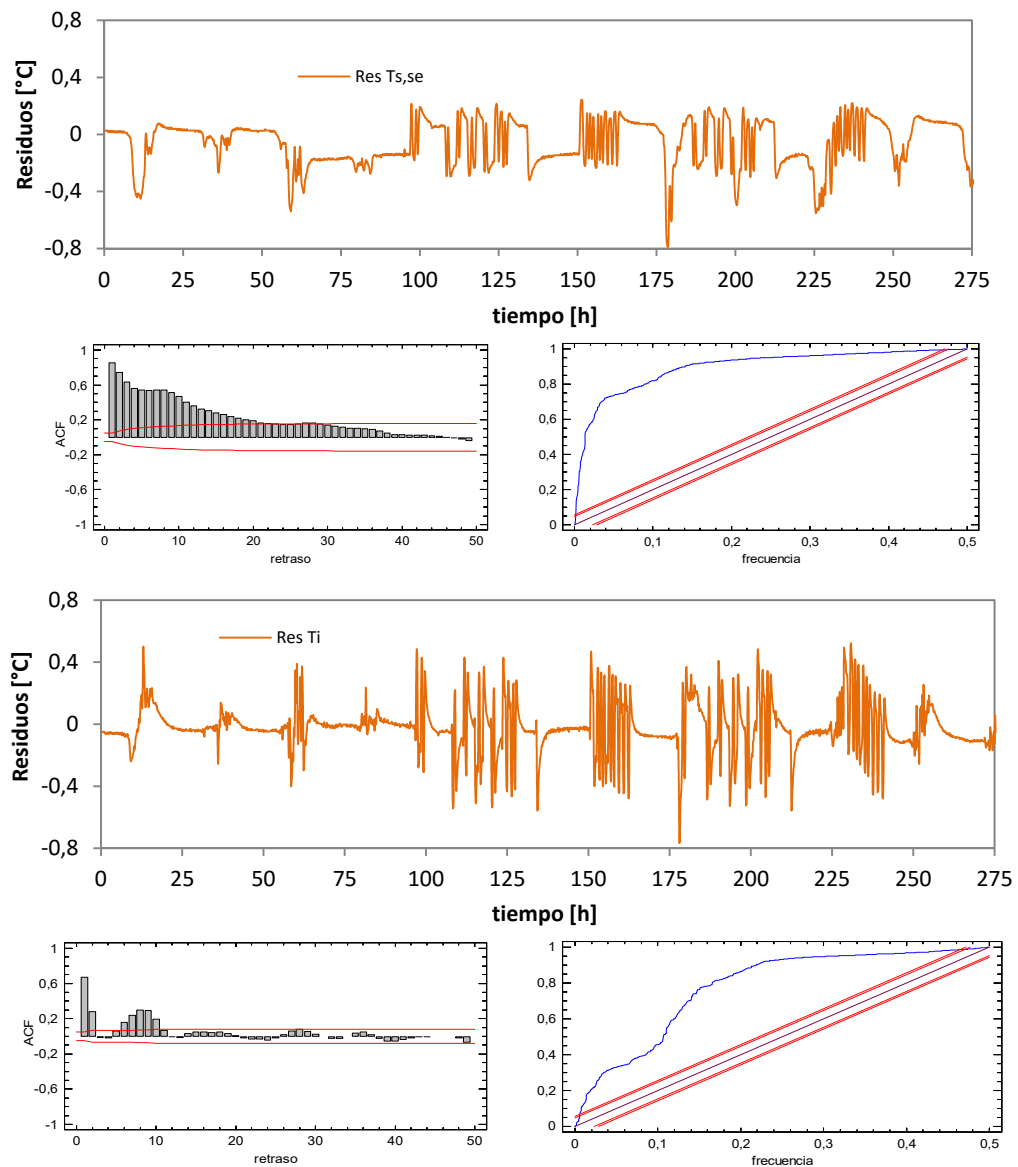


Figura B.29 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro con ventana en el modelo simple

Modelo ampliado

El modelo simple es insuficiente para representar con precisión el comportamiento real de la probeta del segundo componente del ensayo IQ-Test. En principio, la parte de la ventana es la que menor complejidad representa, sin embargo la parte opaca es más delicada. Por un lado, es necesario ampliar el orden del modelo para poder representar adecuadamente la capacidad térmica del perímetro aislante, y por otro lado, la superficie exterior esta recibiendo incidencia solar que genera periodos en los que la superficie exterior es mayor que la temperatura de la superficie interior. Esta situación es imposible de reproducir con el modelo simple definido previamente. Por estas cuestiones se define un modelo ampliado como el que se muestra en la Figura B.30. En las ecuaciones [B.6] y [B.7].

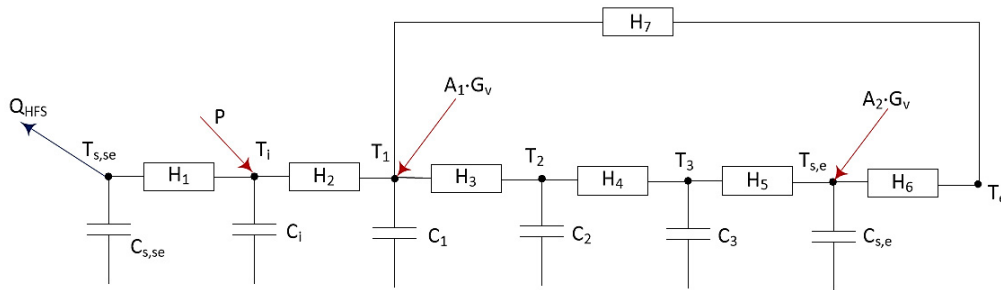


Figura B.30 – Modelo ampliado de la segunda muestra del IQ-Test

$$\begin{bmatrix} dT_{s,se} \\ dT_i \\ dT_1 \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{se} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_1}{C_{s,se}} & \frac{H_1}{C_{s,se}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_1}{C_i} & \frac{-(H_1 + H_2)}{C_i} & \frac{H_2}{C_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_2}{C_1} & \frac{-(H_2 + H_3 + H_7)}{C_1} & \frac{H_3}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_3}{C_2} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_2} & \frac{H_4}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_3} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_3} & \frac{H_5}{C_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_{se}} & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_{se}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{se} \end{bmatrix} dt \quad [B.6]$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{s,se}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_1}{C_1} & \frac{H_7}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_2}{C_{se}} & \frac{H_6}{C_{se}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ G_v \\ T_e \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,se}^m \\ T_i^m \\ T_1^m \\ T_2^m \\ T_3^m \\ T_{se}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{s,se} \\ T_i \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{se} \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ G_v \\ T_e \end{bmatrix} + [e] \quad [B.7]$$

A continuación se recogen los resultados de los modelos de identificación de parámetros junto con el análisis de ruido blanco de los residuos de las funciones objetivo.

1º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	2.57E+02	7.74E+01	56.7507	0.0001	-0.0003
C _{s,se}	500	1000	1500	9.77E+02	8.24E+01	95.4879	-0.0004	0.0002
C _i	1	50	200	7.52E+01	5.16E-01	43.4769	-0.0001	-0.0005
H ₂	10	50	200	9.80E+01	2.34E-01	44.9105	0.0003	0.0000
C ₁	1	50	100	5.10E+01	1.92E+00	24.1541	-0.0004	-0.0003
H ₃	0.6	1	1000	2.02E+02	4.78E-01	93.7100	0.0004	0.0004
H ₇	0.6	1	1000	5.73E+00	2.57E-01	80.0091	0.0002	0.0004
C ₂	1	100	500	1.07E+02	2.89E+01	87.1255	0.0001	0.0002
H ₄	0.6	1	1000	2.85E+00	3.21E-01	54.7450	-0.0003	-0.0004
C ₃	1	100	500	7.14E+01	6.69E+00	22.8934	0.0000	0.0004
H ₅	0.6	1	1000	2.19E+00	4.87E-02	22.8934	0.0001	0.0002
C _{se}	1	50	100	9.82E+01	2.59E+00	22.8934	0.0000	0.0002
H ₆	0.6	1	1000	1.25E+02	3.09E-01	22.8934	-0.0004	-0.0003
A ₁	0.1	1	1.8	1.06E+00	1.04E-01	22.8934	-0.0003	0.0005
A ₂	0.1	1	5	1.61E+00	3.57E-01	22.8934	0.0005	0.0002

Tabla B.28 – Resultados identificación parámetros para 1º ensayo en el modelo ampliado del muro con ventana

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C ₁	H ₃	H ₇	C ₂	H ₄	C ₃	H ₅	C _{se}	H ₆	A ₁	A ₂
H ₁	1														
C _{s,se}	0.18	1													
C _i	0.46	0.09	1												
H ₂	0.27	0.40	0.03	1											
C ₁	0.42	0.22	0.07	0.08	1										
H ₃	0.38	0.02	0.51	0.23	0.54	1									
H ₇	0.45	0.25	0.31	0.60	0.46	0.17	1								
C ₂	0.13	0.07	0.26	0.04	0.06	0.10	0.19	1							
H ₄	0.40	0.57	0.26	0.40	0.41	0.49	0.13	0.24	1						
C ₃	0.36	0.11	0.08	0.45	0.32	0.07	0.51	0.21	0.08	1					
H ₅	0.28	0.01	0.52	0.47	0.06	0.24	0.53	0.15	0.44	0.17	1				
C _{se}	0.10	0.07	0.25	0.51	0.37	0.42	0.20	0.47	0.48	0.11	0.31	1			
H ₆	0.02	0.28	0.35	0.35	0.06	0.51	0.35	0.38	0.38	0.06	0.15	0.28	1		
A ₁	0.36	0.54	0.48	0.35	0.39	0.58	0.09	0.20	0.41	0.41	0.09	0.52	0.46	1	
A ₂	0.30	0.24	0.53	0.17	0.27	0.43	0.30	0.28	0.12	0.31	0.38	0.11	0.53	0.06	1

Tabla B.29 – Coeficientes de correlación parámetros modelo ampliado del muro con ventana para 1º ensayo

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]	dgA [m ²]
Q _{HFS}	1	W	0.006	0.039	0.009
P	0.5	W	0.006	0.017	0.004
G _v	1.5	W	0.041	0.022	0.002
T _e	0.5	K	0.089	0.062	0.005

Tabla B.30 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación en el modelo ampliado para el primer ensayo

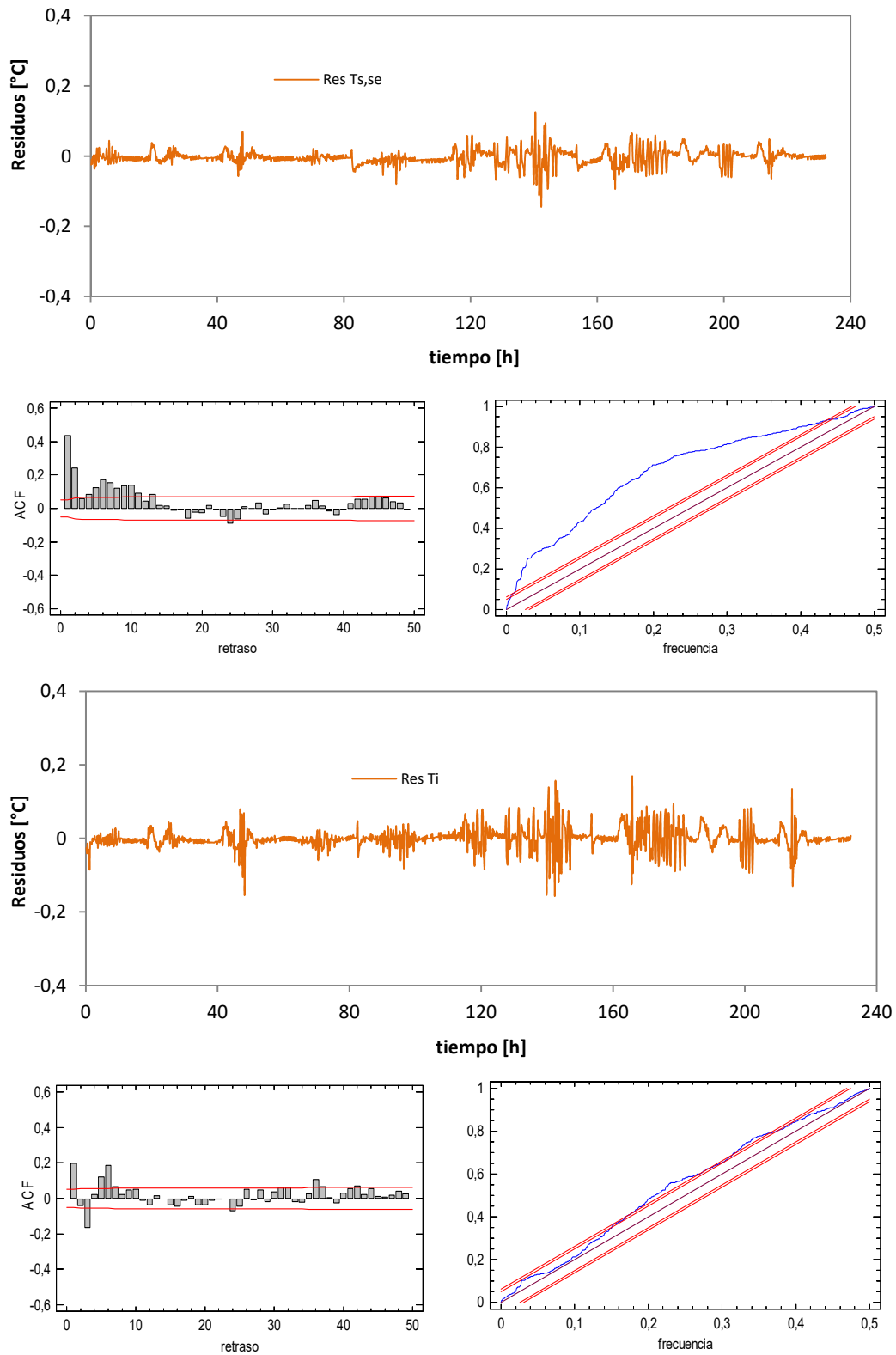


Figura B.31 – Ajuste del modelo para el primer ensayo del muro con ventana en el modelo ampliado

2º ensayo

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	100	300	1000	3.00E+02	9.82E+01	65.1649	0.0017	-0.0010
C _{s,se}	500	1000	1500	1.10E+03	2.17E+01	58.2212	0.0040	-0.0004
C _i	1	50	200	2.94E+01	2.94E+01	49.7937	0.0012	-0.0046
H ₂	10	50	200	6.72E+01	4.52E+00	1.5591	0.0023	0.0025
C ₁	1	50	100	5.73E+01	9.03E+00	86.8745	-0.0009	0.0030
H ₃	0.6	1	1000	5.97E+00	6.23E-02	24.6662	0.0023	0.0036
H ₇	0.6	1	1000	5.38E+00	2.48E-01	70.3356	0.0039	0.0026
C ₂	1	100	500	3.42E+01	4.30E+00	35.8863	-0.0043	-0.0036
H ₄	0.6	1	1000	1.70E+00	4.65E-02	56.2171	0.0012	-0.0010
C ₃	1	100	500	1.25E+02	1.73E+01	28.9478	0.0023	-0.0002
H ₅	0.6	1	1000	6.95E+00	1.10E-01	96.2672	-0.0002	-0.0033
C _{se}	1	50	100	8.56E+01	4.61E+00	71.7773	0.0015	0.0005
H ₆	0.6	1	1000	1.83E+02	8.14E-01	55.6629	0.0011	0.0047
A ₁	0.1	1	1.8	1.01E+00	8.56E-02	84.2077	-0.0008	-0.0012
A ₂	0.1	1	5	1.70E+00	8.31E-02	12.4660	-0.0044	0.0024

Tabla B.31 – Resultados identificación parámetros para 2º ensayo en el modelo ampliado del muro con ventana

	H ₁	C _{s,se}	C _i	H ₂	C ₁	H ₃	H ₇	C ₂	H ₄	C ₃	H ₅	C _{se}	H ₆	A ₁	A ₂
H ₁	1														
C _{s,se}	0.55	1													
C _i	0.49	0.55	1												
H ₂	0.16	0.22	0.25	1											
C ₁	0.01	0.30	0.51	0.48	1										
H ₃	0.22	0.45	0.35	0.50	0.55	1									
H ₇	0.03	0.46	0.39	0.12	0.17	0.07	1								
C ₂	0.59	0.38	0.44	0.50	0.14	0.49	0.35	1							
H ₄	0.05	0.51	0.20	0.24	0.09	0.55	0.48	0.27	1						
C ₃	0.41	0.54	0.12	0.10	0.04	0.37	0.29	0.45	0.03	1					
H ₅	0.32	0.41	0.28	0.50	0.38	0.02	0.21	0.29	0.27	0.03	1				
C _{se}	0.26	0.42	0.37	0.39	0.13	0.29	0.05	0.35	0.57	0.06	0.32	1			
H ₆	0.19	0.26	0.28	0.33	0.28	0.26	0.53	0.06	0.14	0.52	0.02	0.27	1		
A ₁	0.11	0.33	0.14	0.37	0.20	0.21	0.10	0.59	0.44	0.30	0.49	0.32	0.47	1	
A ₂	0.58	0.28	0.45	0.24	0.07	0.47	0.42	0.24	0.21	0.01	0.06	0.43	0.36	0.56	1

Tabla B.32 – Coeficientes de correlación parámetros modelo ampliado del muro con ventana para 2º ensayo

variable	u _{medida}	unidades	dU [W/m ² K]	dC [MJ/m ² K]	dgA [m ²]
Q _{HFS}	1	W	0.008	0.047	0.007
P	0.5	W	0.007	0.049	0.001
G _v	1.5	W	0.039	0.026	0.004
T _e	0.5	K	0.051	0.059	0.008

Tabla B.33 – Efecto del error de las variables de medida en el resultado del modelo de identificación en el modelo ampliado para el segundo ensayo

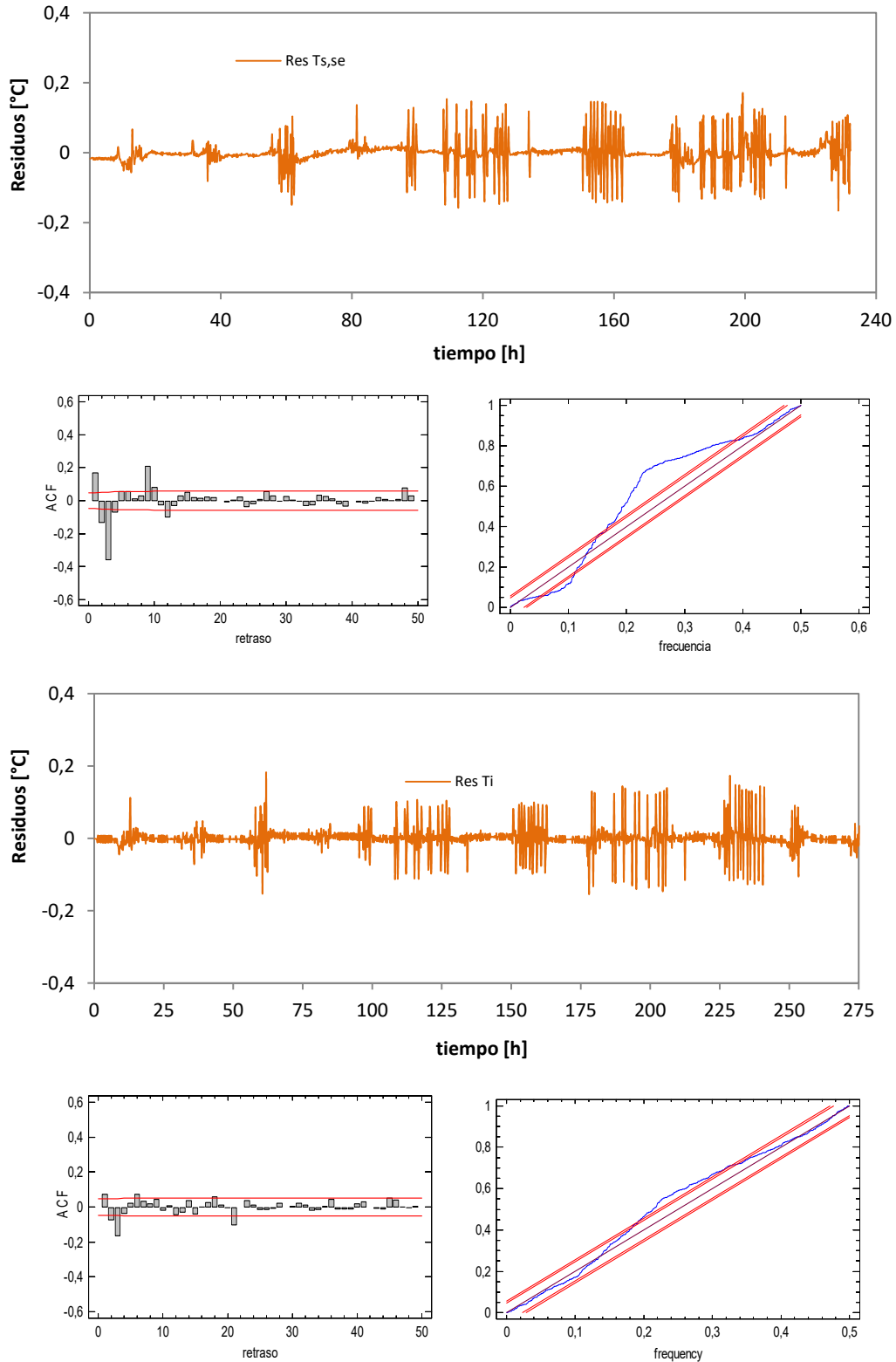


Figura B.33 – Ajuste del modelo para el segundo ensayo del muro con ventana en el modelo ampliado

En base a los datos obtenidos con el modelo ampliado del segundo componente, y teniendo en cuenta los resultados de los ensayos del muro opaco, junto con las incertidumbres de medida, se obtienen los valores recogidos en la Tabla B.34.

	Muro Completo			Ventana			
	Opaco + Ventana						
	UA [W/K]	UA [W/K]	gA [m ²]	U [W/m ² K]	e _U [W/m ² K]	g [-]	e _g [-]
1º ENSAYO	6,95	5,43	1,06	2,89	0,22	0,57	0,06
2º ENSAYO	6,48	5,22	1,01	2,78	0,18	0,54	0,05

Tabla B.34 – Resultados de los dos ensayos del segundo componente del IQ-Test

De cara al ensayo interlaboratorio, se emplean los resultados obtenidos en el segundo ensayo, tanto para el primer componente como para el segundo. Ya que, cómo se ha detectado en el estudio de las dos posiciones de la muestra dentro del portaprobetas, la colocación a ras del interior reduce los efectos de puentes térmicos, mejorando la precisión del ensayo sin afectar a los parámetros exteriores, coeficiente de convección y factor solar.

Anexo C

Caracterización experimental de fachadas



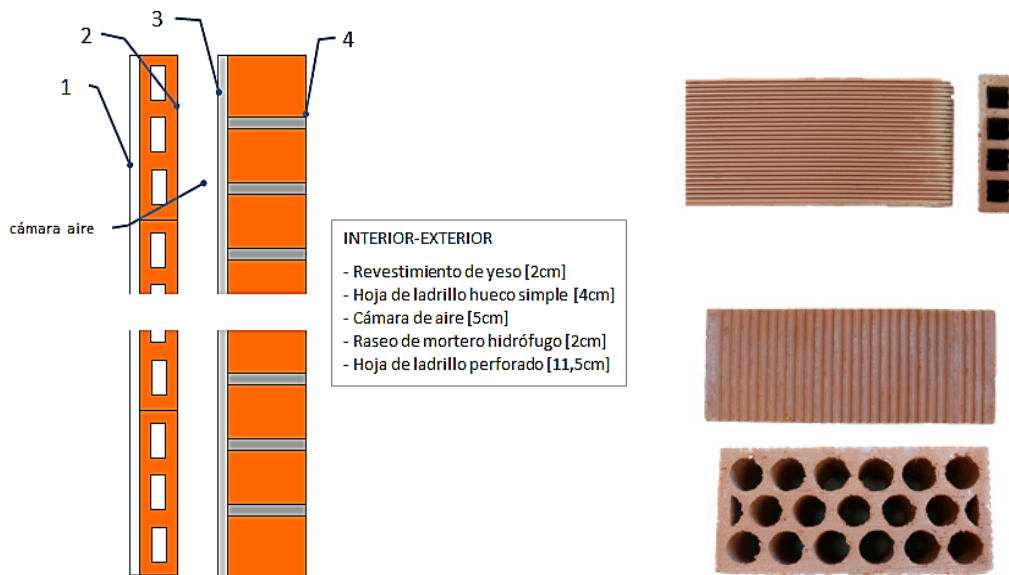


C.1 Muro base

Debido a la gran cantidad de información respecto a la instrumentación instalada en las probetas ensayadas, así como los datos de los ensayos de contraste, en la Memoria se indican los valores fundamentales. A continuación se desarrollan con más detalle estos aspectos de los ensayos experimentales.

C.1.1 Instrumentación de la muestra

El primer componente de ensayo es un muro de doble hoja formada por fábrica de ladrillo. En la Figura C.1 se muestran las características de la muestra y un detalle de los bloques cerámicos empleados.



Aunque se trata de la probeta de ensayo más sencilla, su caracterización precisa es fundamental, ya que sirve como base para el resto de ensayos de la presente tesis, salvo en el caso de la probeta de fachada ligera forzada. En la Tabla C.1 se muestra el número de sensores instalados en dicha probeta.

MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES					
		CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5	CAPA 6	
MURO BASE	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	3	3		
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1			

Tabla C.1 – Sensores instaladas en la probeta del muro base y en el muro aislado

En total, se instalan 15 sensores de temperatura y 4 sensores de flujo de calor, en la Figura C.2 se muestran la distribución de dichos sensores en las diferentes capas que conforman la muestra. Las diferentes sondas se referencian mediante el

procedimiento estandarizado de trazabilidad de la metodología *PASLINK*, así como mediante un referencia propia de la muestra que facilita su análisis y tratamiento posterior. También se emplean los número de referencia de las sondas propias de la base de datos de instrumentación del Área Térmica, AT, del Laboratorio de Control de la Calidad en la Edificación, LCCE, que permiten asociar las calibraciones correspondientes.

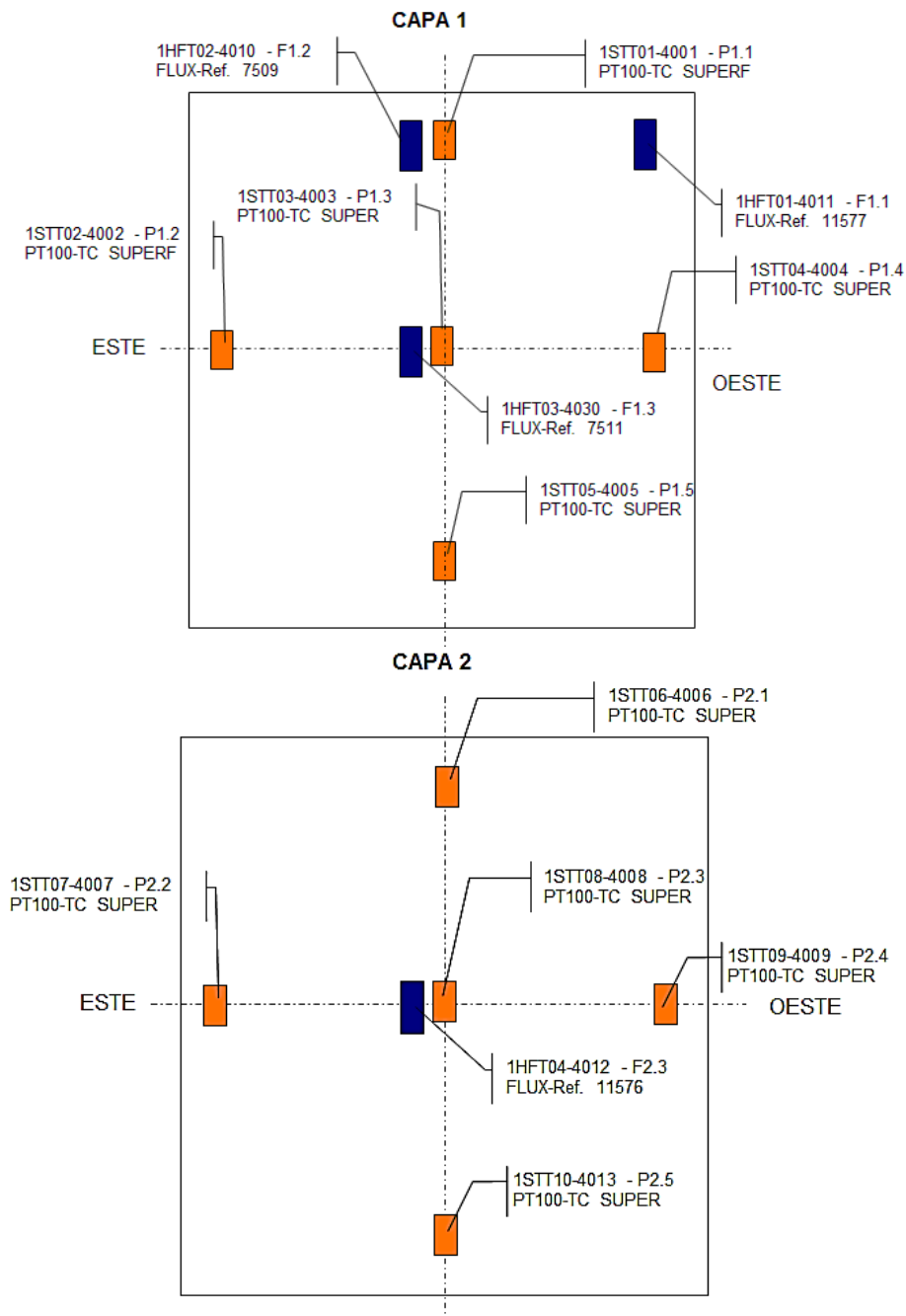


Figura C.2 – Disposición de las sondas en las capas de la muestra de muro base

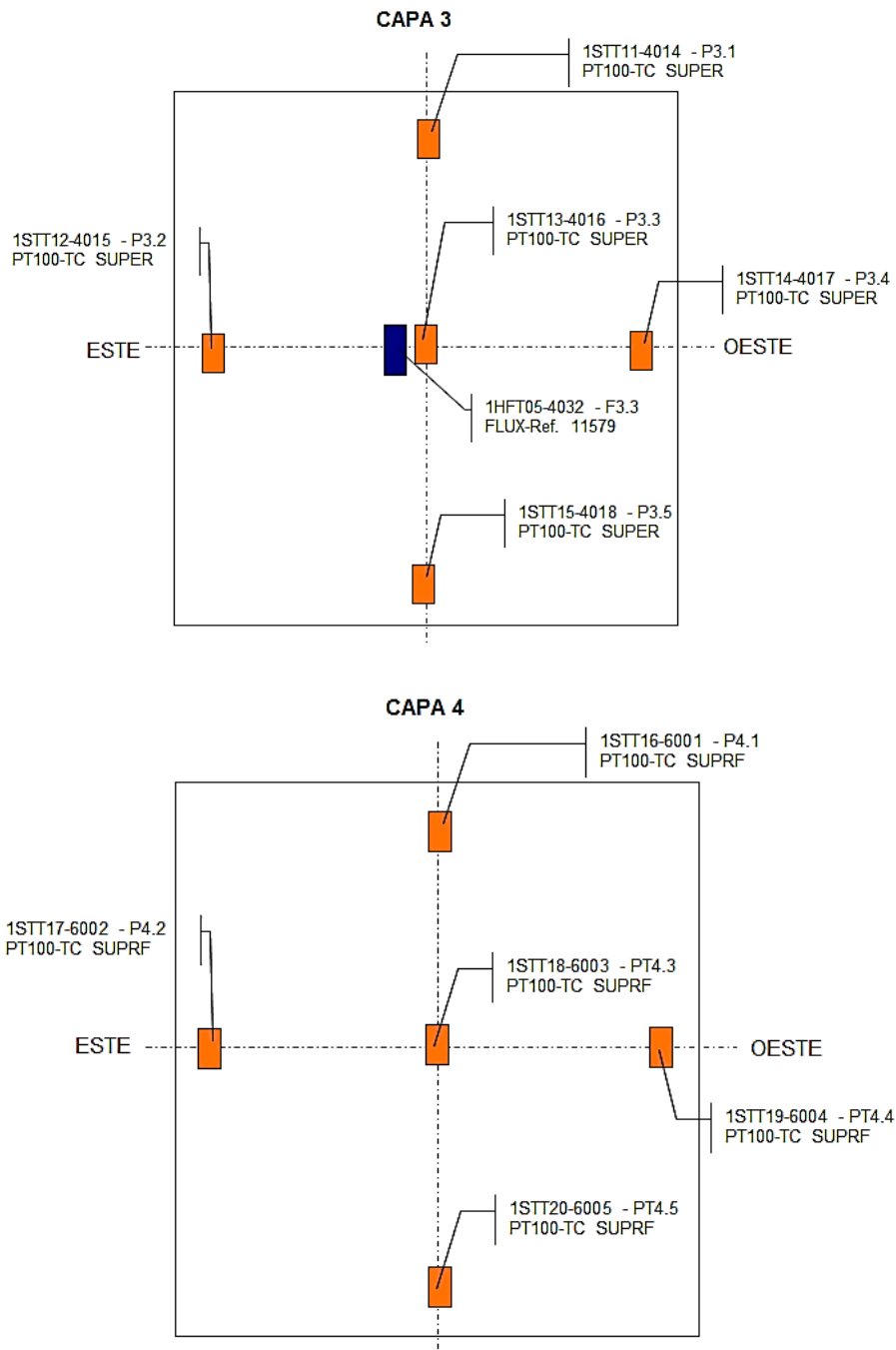


Figura C.3 – Disposición de las sondas en las capas de la muestra de muro base

C.1.2 Datos experimentales complementarios

A continuación se recogen los datos complementarios del ensayo que se realiza sobre la muestra de muro base y que no se indican en la Memoria debido a su extensión. En la Figura C.4 se muestran las temperaturas de control del entorno de la sala de ensayos. Por un lado, las temperaturas de aire en cubierta y suelo de la celda, así como la registrada por la estación meteorológica situada a 10 [m] de altura. También se

muestran la temperatura de aire de la sala de servicio junto con la temperatura superficial de la pared de acceso a la sala de ensayos.

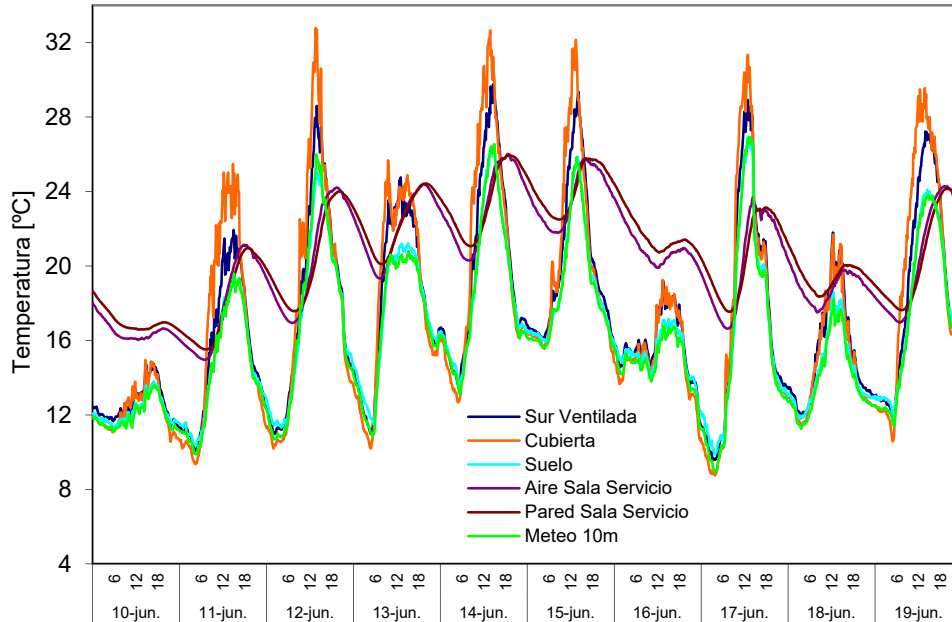


Figura C.4 – Temperaturas del entorno de la celda durante el ensayo del muro base

En la Figura C.5 y en la Figura C.6 se muestran las temperaturas registradas por las sonda de aire y de superficie en la sala de ensayos. La media de estas sondas se emplean para determinar la temperas empleadas en los modelos para representar el comportamiento de la celda.

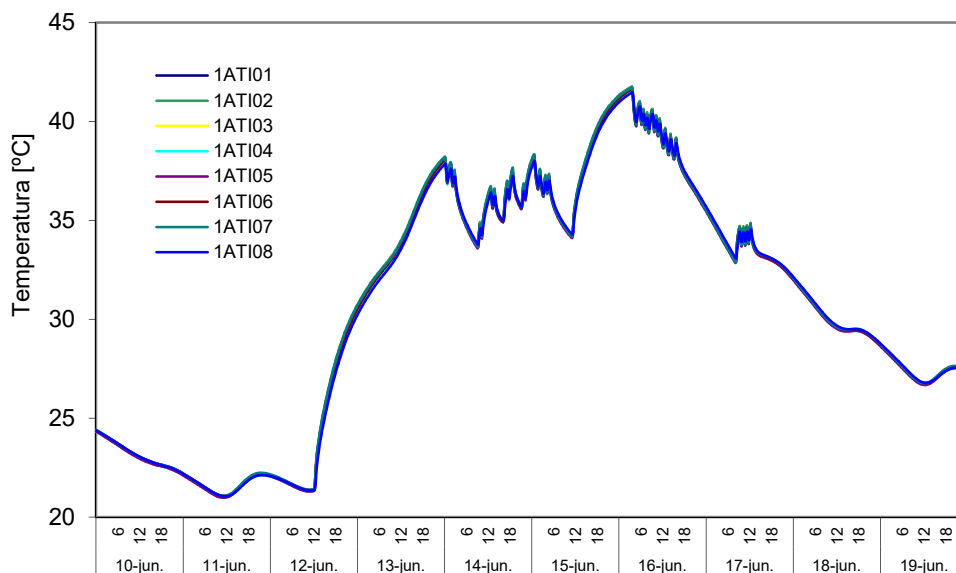


Figura C.5 – Temperaturas de aire en la sala de ensayo durante el ensayo del muro base

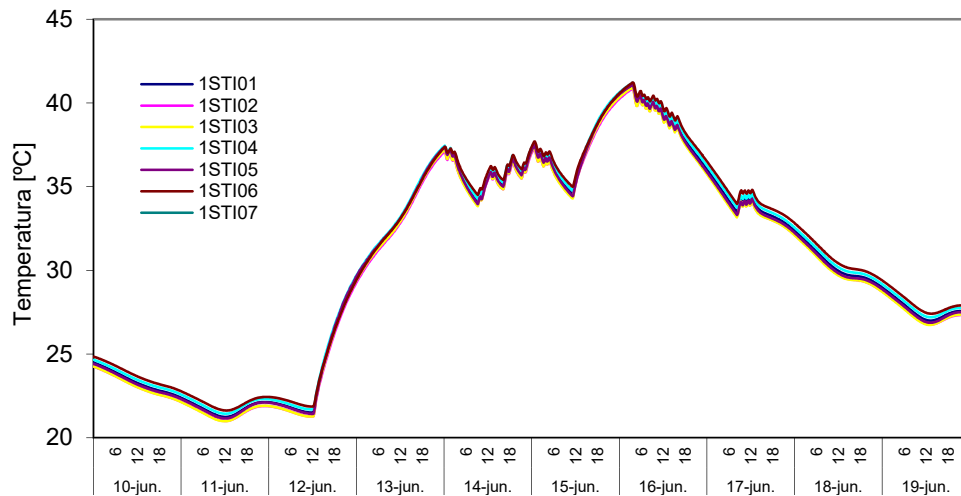


Figura C.6 – Temperaturas de superficie en la sala de ensayo durante el ensayo del muro base

En la Figura C.7 y Figura C.8 se muestran los flujos de calor que registra cada grupo de tiles de la envolvente de la sala de ensayos.

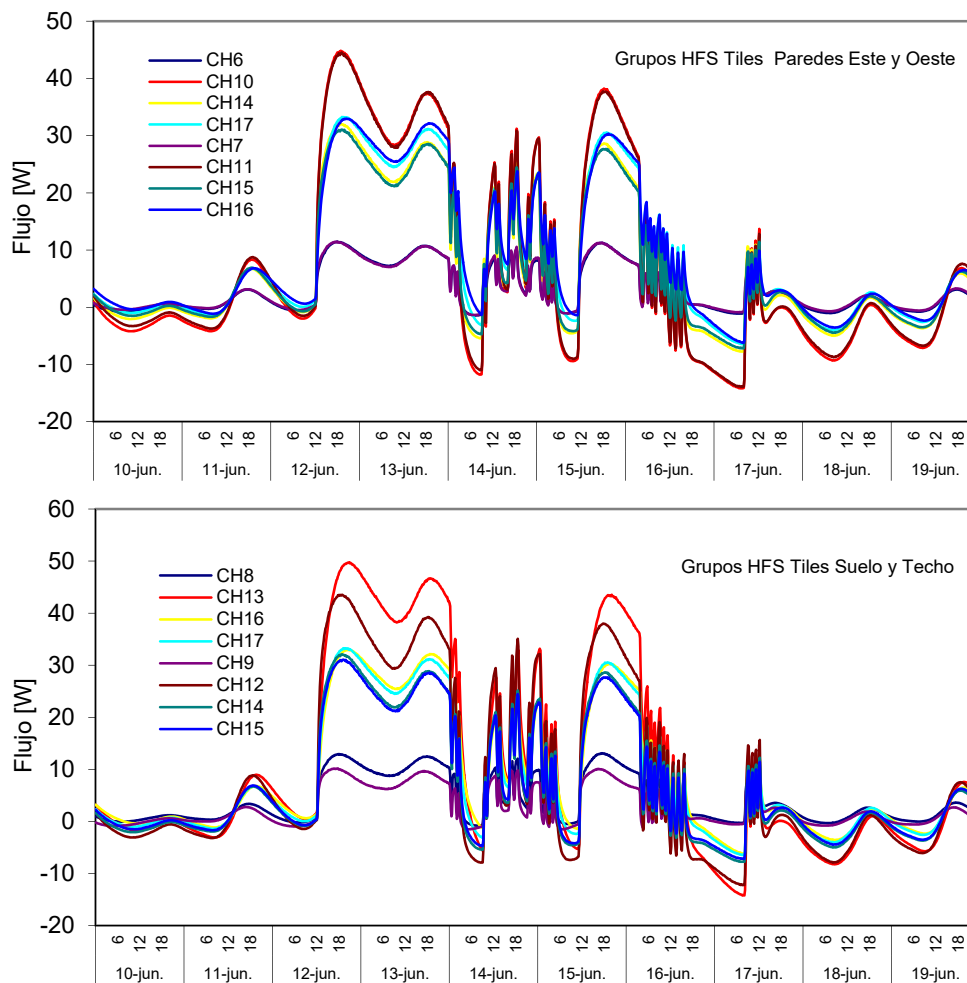


Figura C.7 – Flujos de calor medidos por los grupos de tiles durante el ensayo del muro base

En la Figura C.8 y en la Figura C.9 se muestran las señales de los sensores de las multitiles situadas en los grupos de borde de referencia. Estos flujos permiten determinar, para cada instante, los factores de corrección de las lecturas de flujo en dichas zonas donde el flujo es bidimensional.

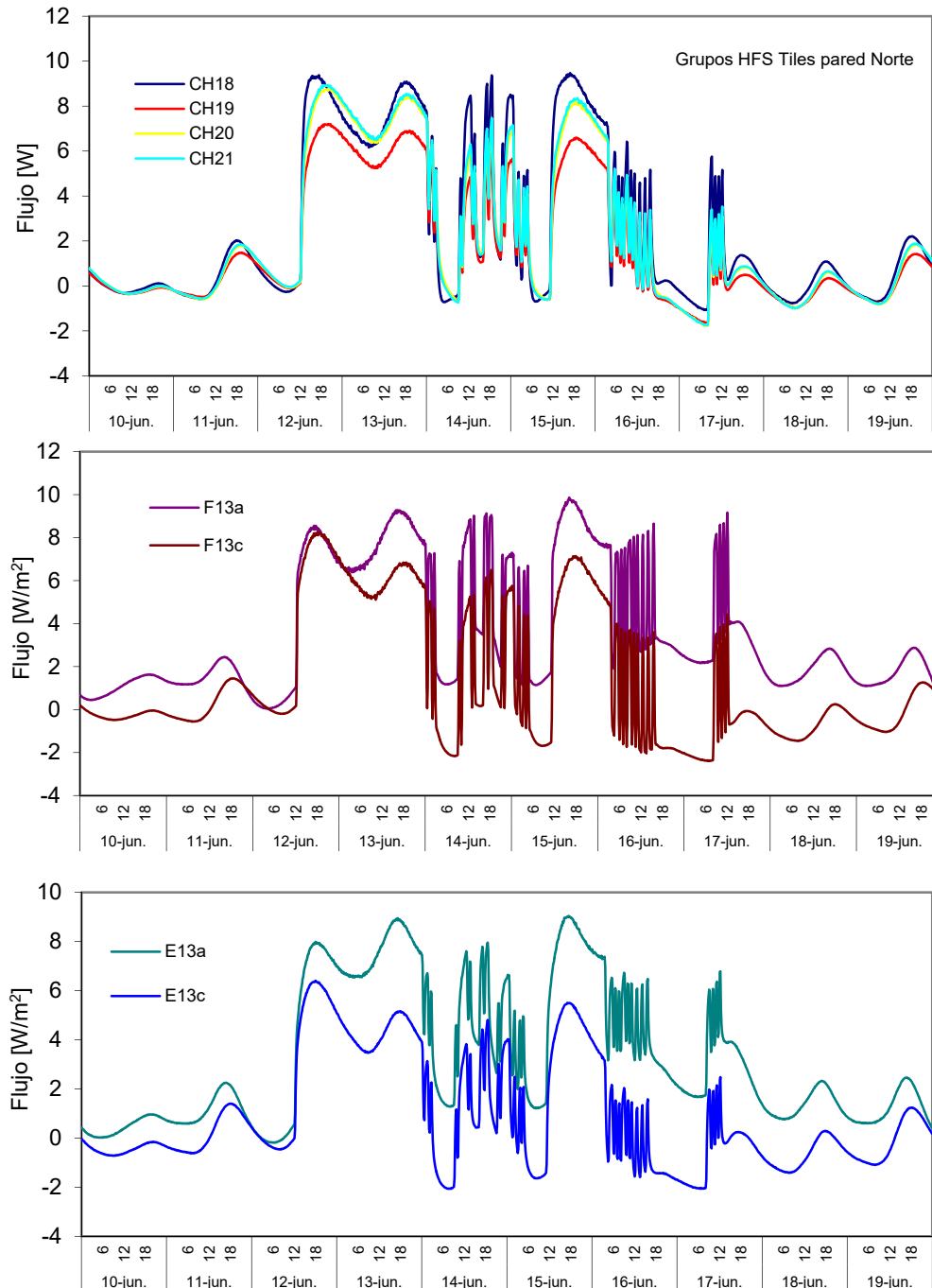


Figura C.8 – Flujos de calor medidos por las *multitiles* las durante el ensayo del muro base

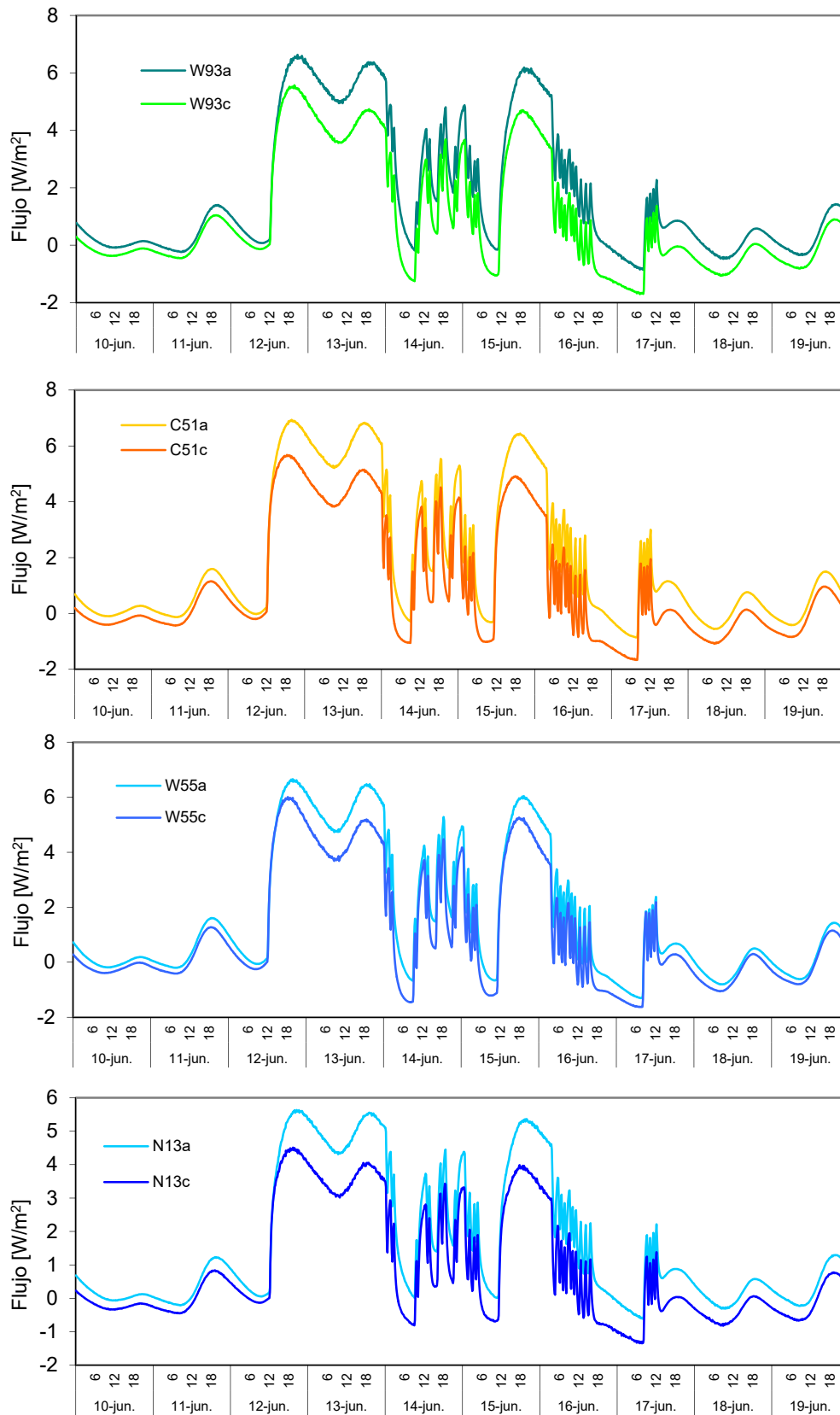


Figura C.9 – Flujos de calor medidos por las *multitiles* las durante el ensayo del muro base

En las Figuras C.10 y Figuras C.11 se muestran las lecturas de cada sonda de temperatura instalada en las diferentes capas de la muestra de muro base.

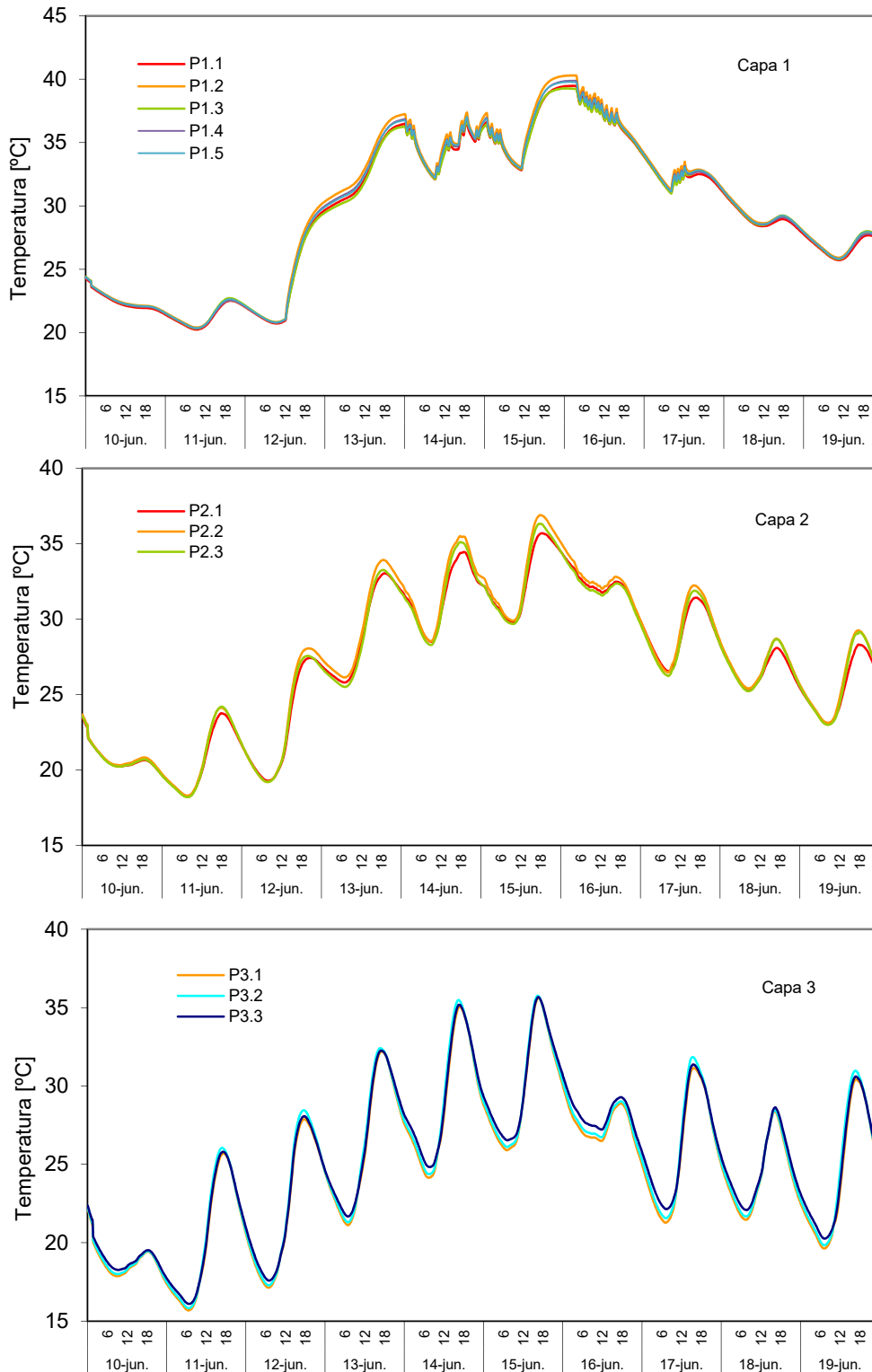


Figura C.10 – Temperaturas en cada capa durante el ensayo del muro base

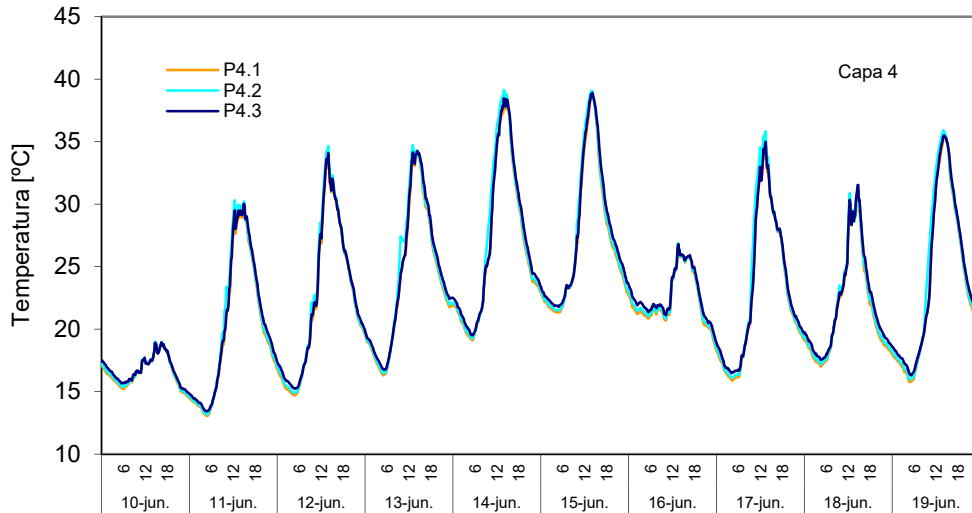


Figura C.11 – Temperaturas en cada capa durante el ensayo del muro base

C.2 Muro base con aislamiento

La colocación del aislamiento sobre la superficie exterior es sencilla y directa. A continuación se muestran los datos de instrumentación añadida sobre la probeta y los datos experimentales complementarios para obtener las variables de análisis mostradas en la Memoria.

C.2.1 Instrumentación de la muestra

En la Figura C.12 se muestra el esquema de montaje del aislante rematado por una capa de mortero con malla de tracción. En la Tabla C.2 se indica la instrumentación total instalada en la probeta.

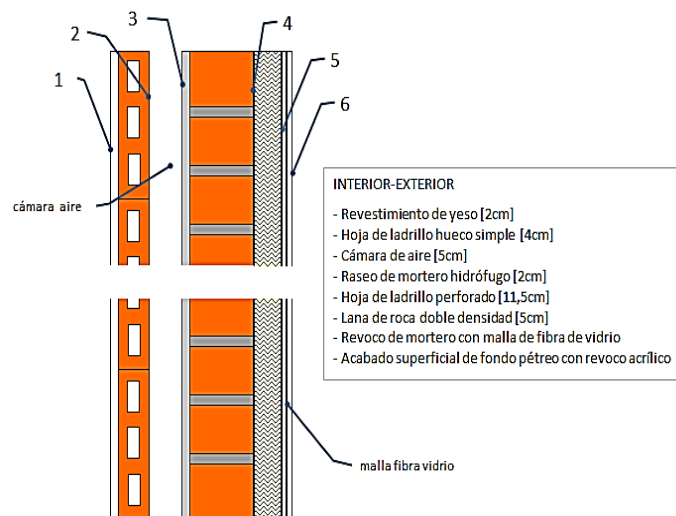


Figura C.12 – Solución constructiva del SATE aplicado al muro base

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES				
			CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5	CAPA 6
MURO BASE +SATE	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5			5
	Temperatura	Termopar tipo T			5	5	
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1	2	2	

Tabla C.2 – Sensores instaladas en la probeta del muro base y en el muro aislado

En total se instalan 30 sondas de temperatura de las cuales 20 son PT100 y 10 son termopares tipo T. Se emplean termopares en las intercapas en las que la sondas se recubre de morteso, yeso, o algún tipo de masa húmeda que puede dañar la termorresistencia. Además se instalan 8 sensores de flujo de calor. En la Figura C.13 y en la Figura C.14 se muestra la distribución de la instrumentación colocada que difiere de la instrumentación original del muro base ya mostrada.

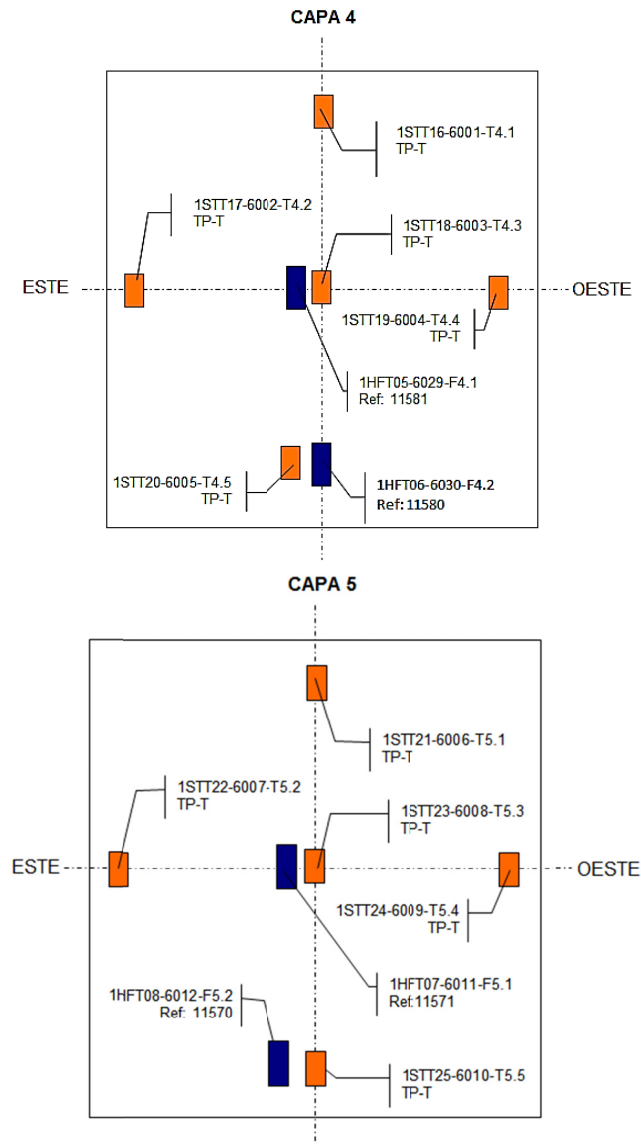


Figura C.13 – Instrumentación añadida al muro base con aislamiento

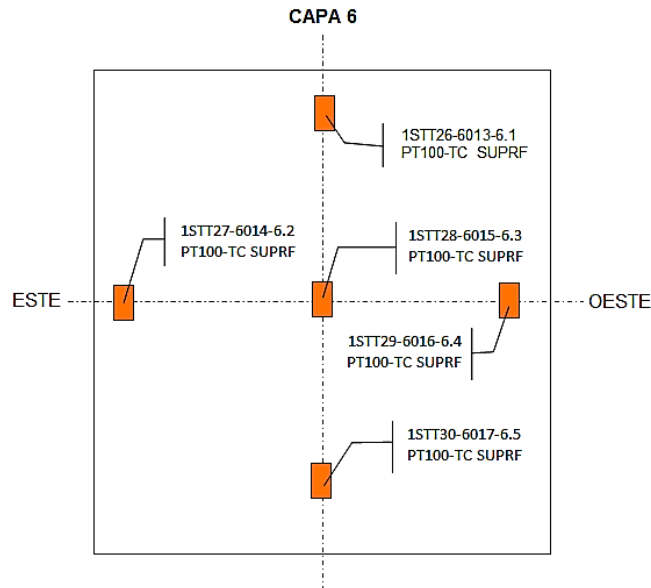


Figura C.14 – Instrumentación añadida al muro base con aislamiento

C.2.2 Datos experimentales complementarios

Como en el caso del muro base, la caracterización experimental se realiza mediante un único periodo de ensayo. En el presente apartado se muestran los datos complementarios que se registran en el ensayo que no se muestran en la memoria debido a su extensión. En la Figura C.15 y en la Figura C.16 se muestran las temperaturas registradas por las sonda de aire y de superficie en la sala de ensayos. La media de estas sondas se emplean para determinar la temperas empleadas en los modelos para representar el comportamiento de la celda.

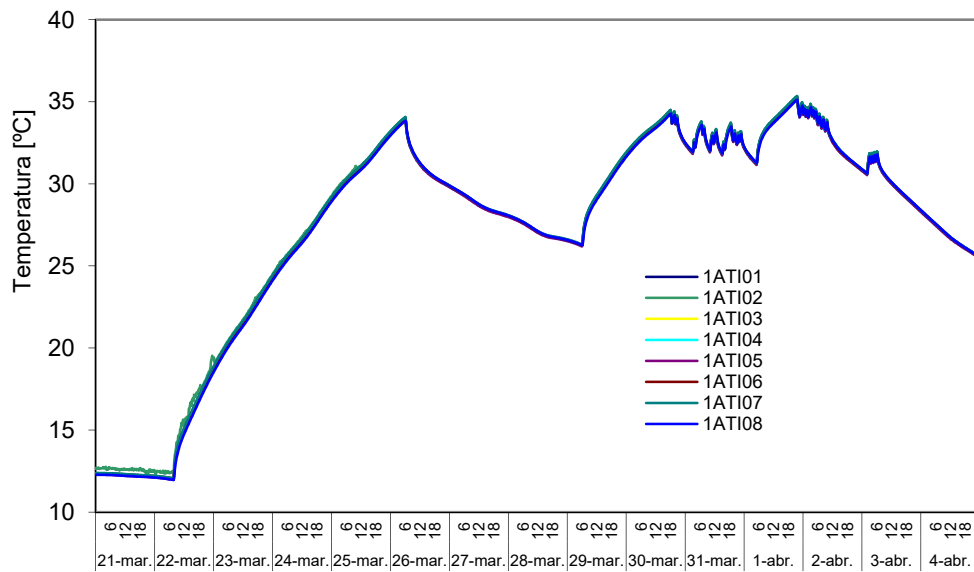


Figura C.15 – Temperaturas de aire en la sala de ensayo durante el ensayo del muro base con aislamiento

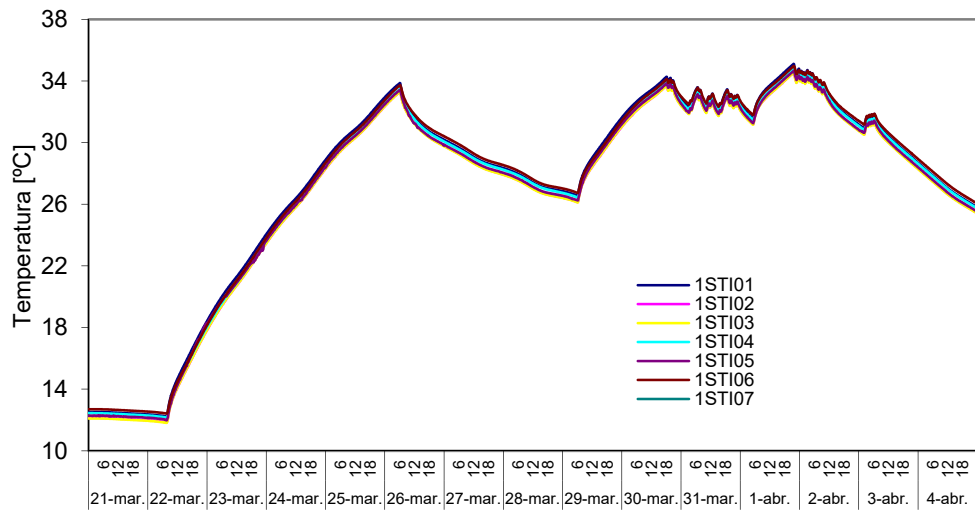


Figura C.16 – Temperaturas superficie envolvente celda durante el ensayo del muro base con aislamiento

En la Figura C.17 y Figura C.18 se muestran los flujos de calor que registra cada grupo de *tilas* de la envolvente de la sala de ensayos.

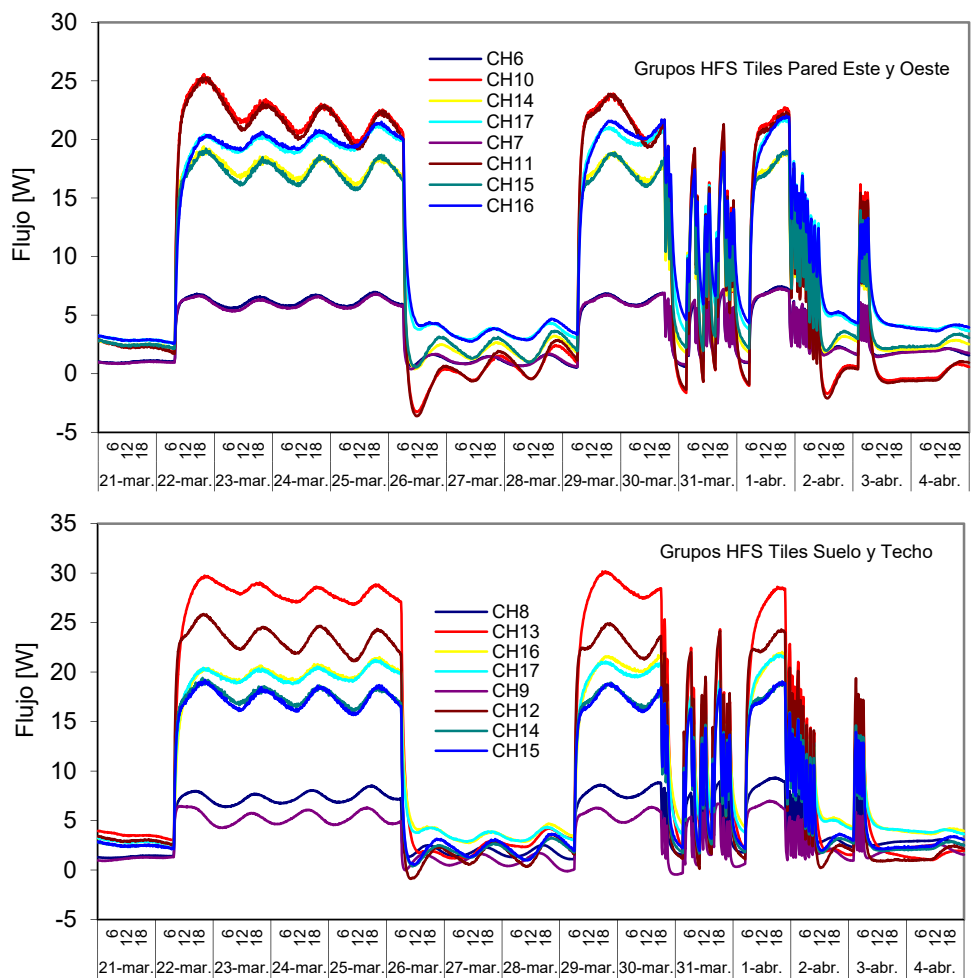


Figura C.17 – Flujos de calor medidos por grupos de *tilas* durante el ensayo del muro base con aislamiento

En la Figura C.18 y en la Figura C.19 se muestran las señales de los sensores de las multitiles situadas en los grupos de borde de referencia.

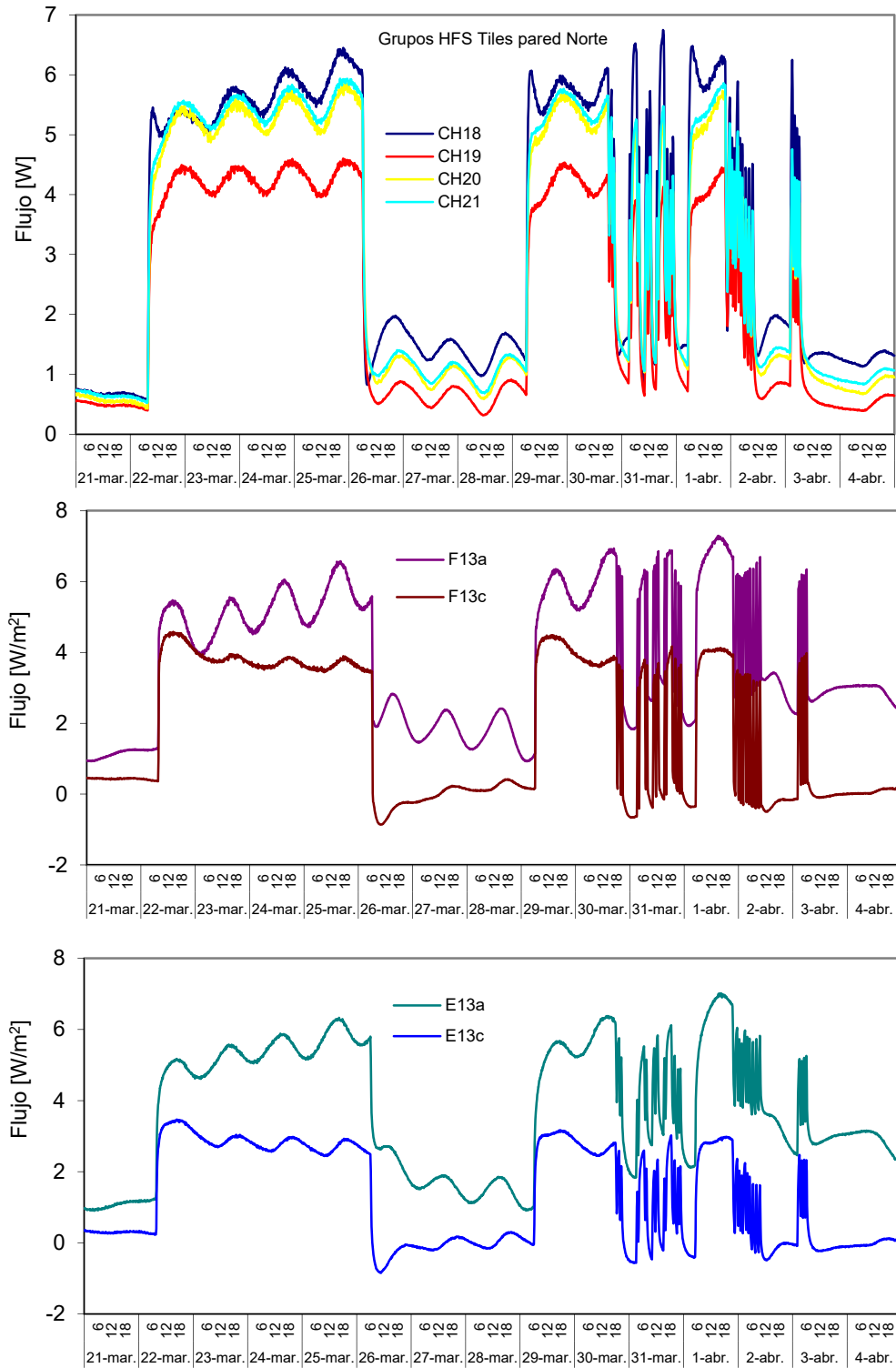


Figura C.18 – Flujos de calor medidos por las multitiles las durante el ensayo del muro base con aislamiento

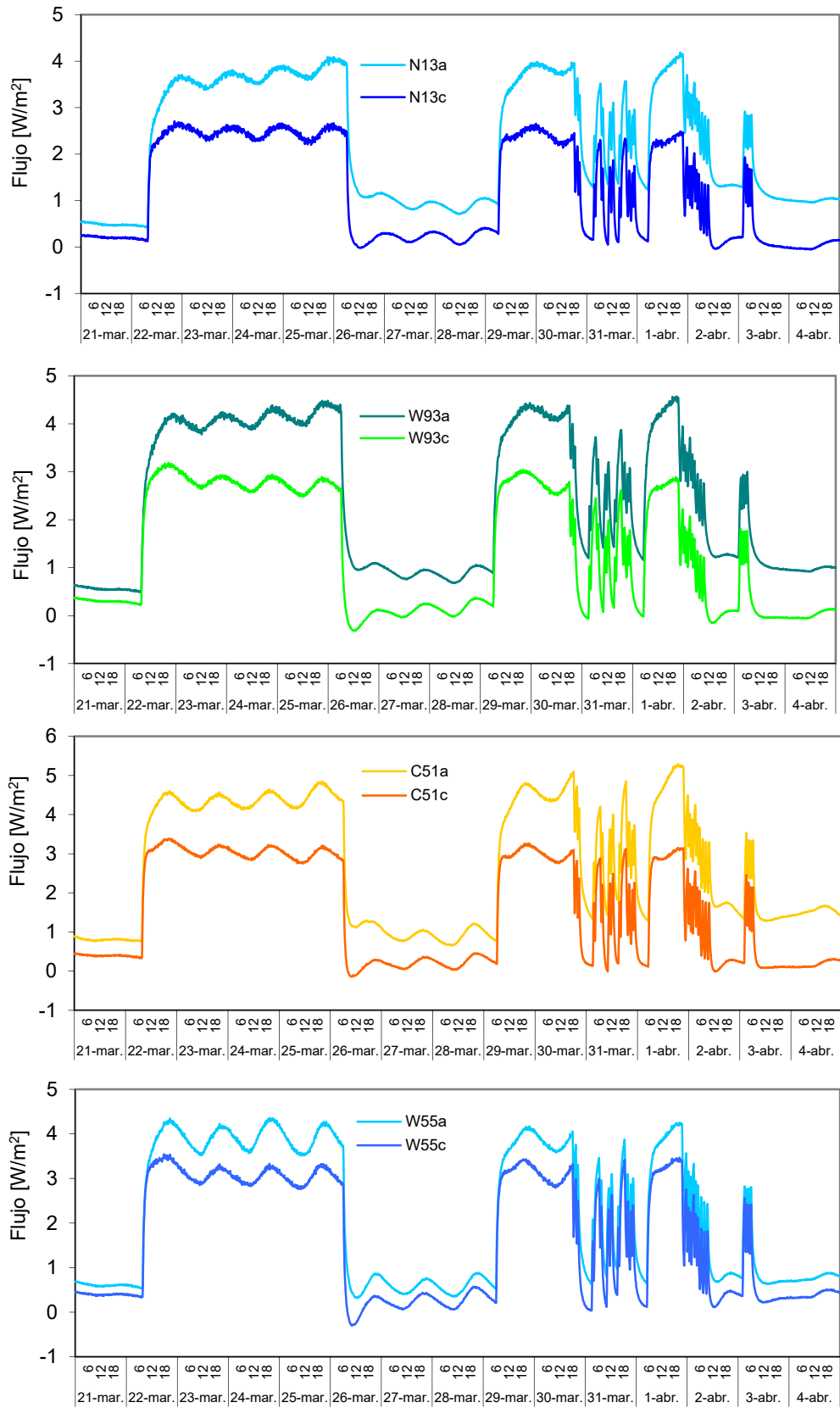


Figura C.19 – Flujos de calor medidos por las *multitiles* las durante el ensayo del muro base con aislamiento

En las Figuras C.20 y Figuras C.21 se muestran las lecturas de cada sonda de temperatura instalada en las diferentes capas de la muestra de muro base con aislamiento.

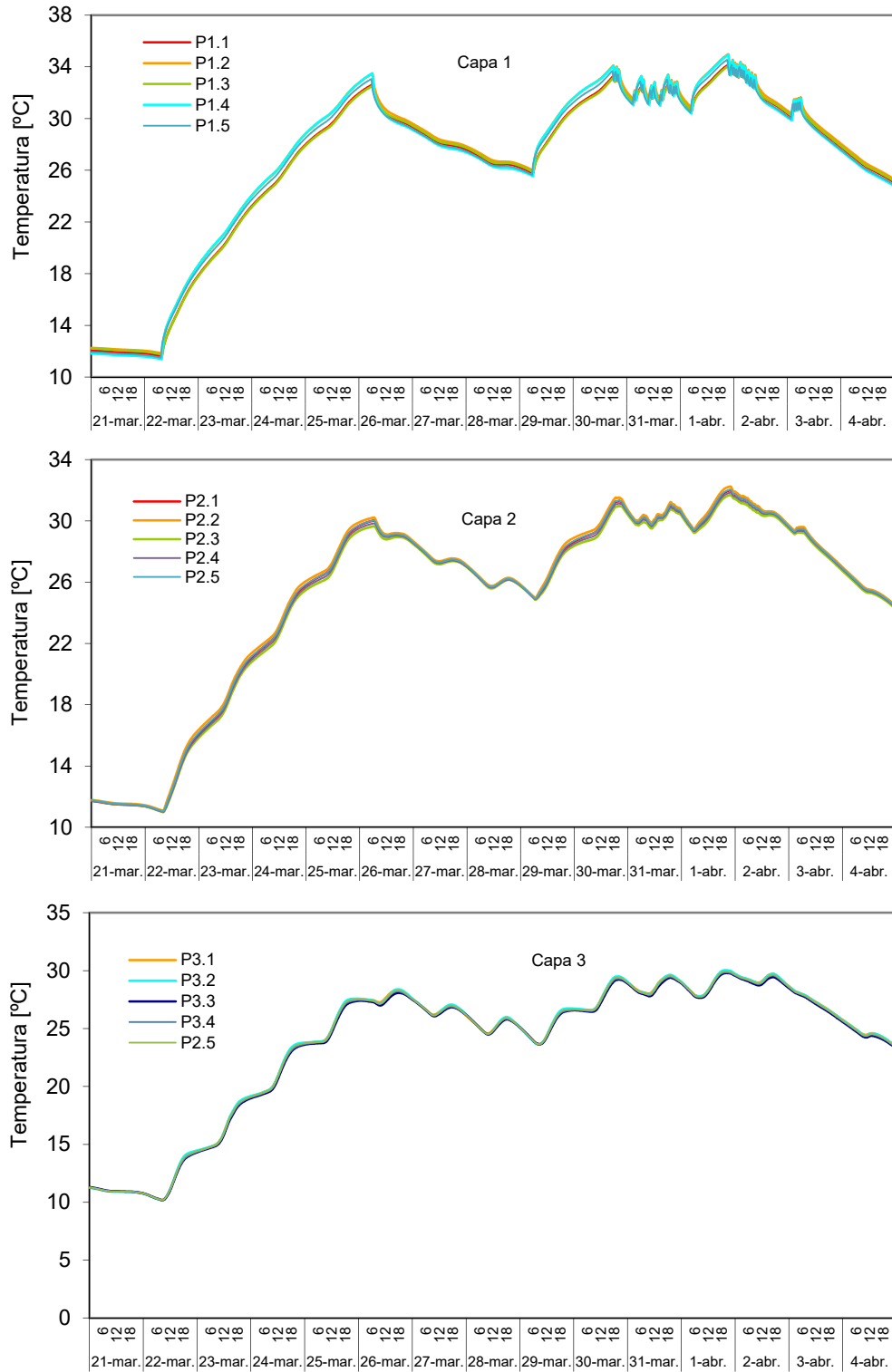


Figura C.20 – Temperaturas en cada capa durante el ensayo del muro base con aislamiento

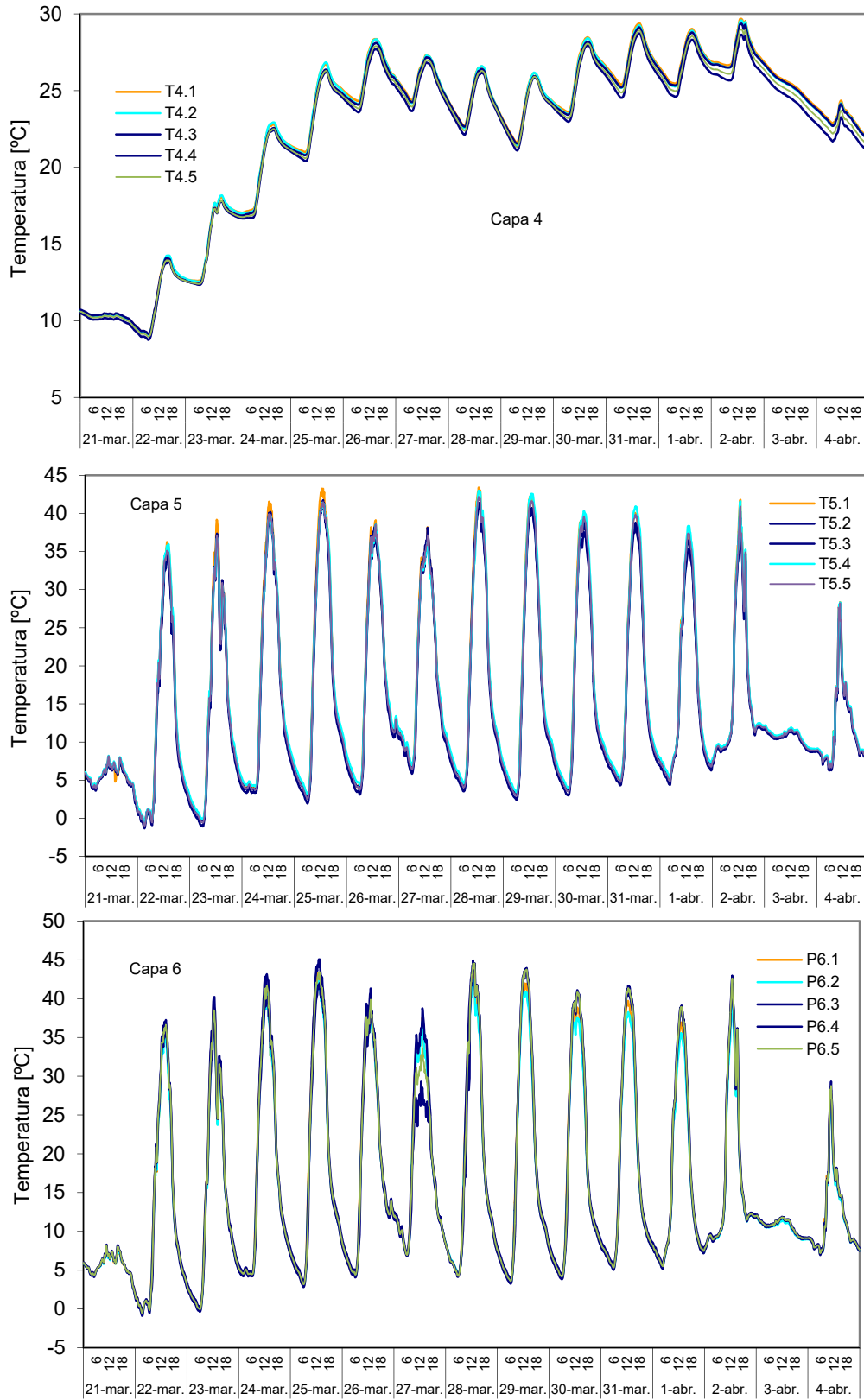


Figura C.21 – Temperaturas en cada capa durante el ensayo del muro base con aislamiento

C.3 Fachada ventilada ligera

En el caso de las probetas de fachada ventilada la caracterización experimental se complica. La componente activa de la cámara de aire ventilada implica un cambio en el proceso de transmisión de calor asociado a las condiciones del ambiente exterior. Por esta razón, se modifica la configuración de las sondas a colocar en la cámara de aire. La decisión del número, tipo y posición de dichas sondas es muy importante de cara a disponer de la información suficiente como para modelizar adecuadamente el comportamiento de la fachada. En este ámbito hay poca información disponible, por esa razón se han realizado simulaciones previas mediante modelos de CFD para determinar la posición idónea de cara a poder registrar los puntos más representativos de proceso de convección empleando la instrumentación mínima necesaria, ya que emplear muchas sondas complica el proceso de medida y adquisición y aumenta las probabilidades de fallos en el sistema. Por otro lado, se realizan dos periodos de ensayos, el primero se puede emplear para el proceso de modelado de los fenómenos de transmisión de calor en la cámara ventilada, y el segundo periodo como verificación de la validez de dichos modelos, y en su caso, reajustar las divergencias detectadas. Un ejemplo de esta aplicación de contraste se muestra en la Memoria para la fachada ventilada ligera. Además, se aumenta la cantidad de información disponible para futuros estudios en el ámbito de cámaras ventiladas. A continuación se indican la instrumentación empleada en la probeta y los datos correspondientes al periodo de contraste que no se recogen en el documento de la Memoria debido a su extensión.

C.3.1 Instrumentación de la muestra

En la Figura C.22 se muestra el esquema de capas que configuran la muestra de fachada ventilada ligera. Hasta la capa 4 la configuración es idéntica a la del muro base con aislamiento, ver Tabla C., y para el resto de capas nuevas, los esquemas de colocación de las sondas se muestran en la Figura C.23, en la Figura C.24 y en la Figura C.25.

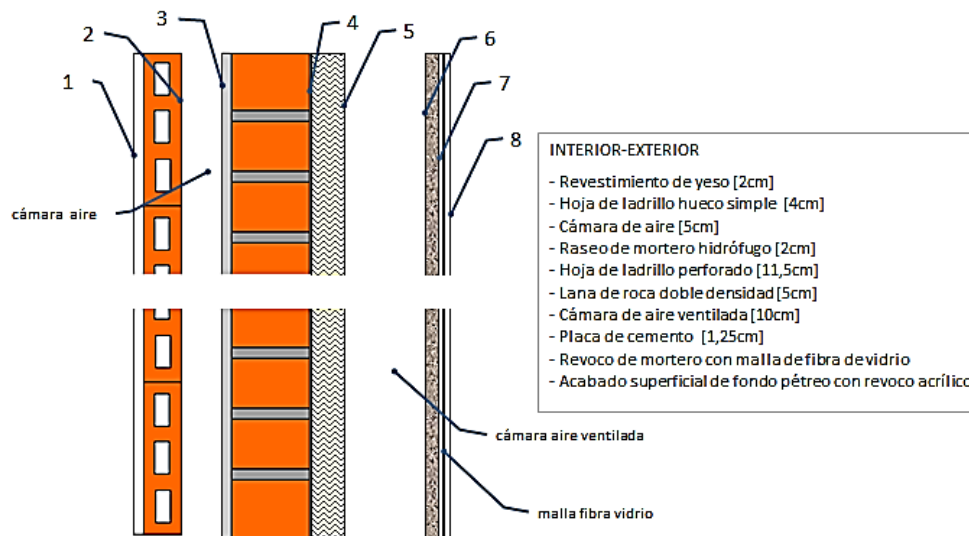


Figura C.22 – Solución constructiva de la fachada ventilada ligera

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES						
			CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5-6	CAPA 7	CAPA 8	CA
MURO BASE + FV L	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5		6		6	6
	Temperatura	Termopar tipo T			5		6		
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1		3			
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1							4

Tabla C.3 – Sensores instalados en la probeta de fachada ventilada ligera

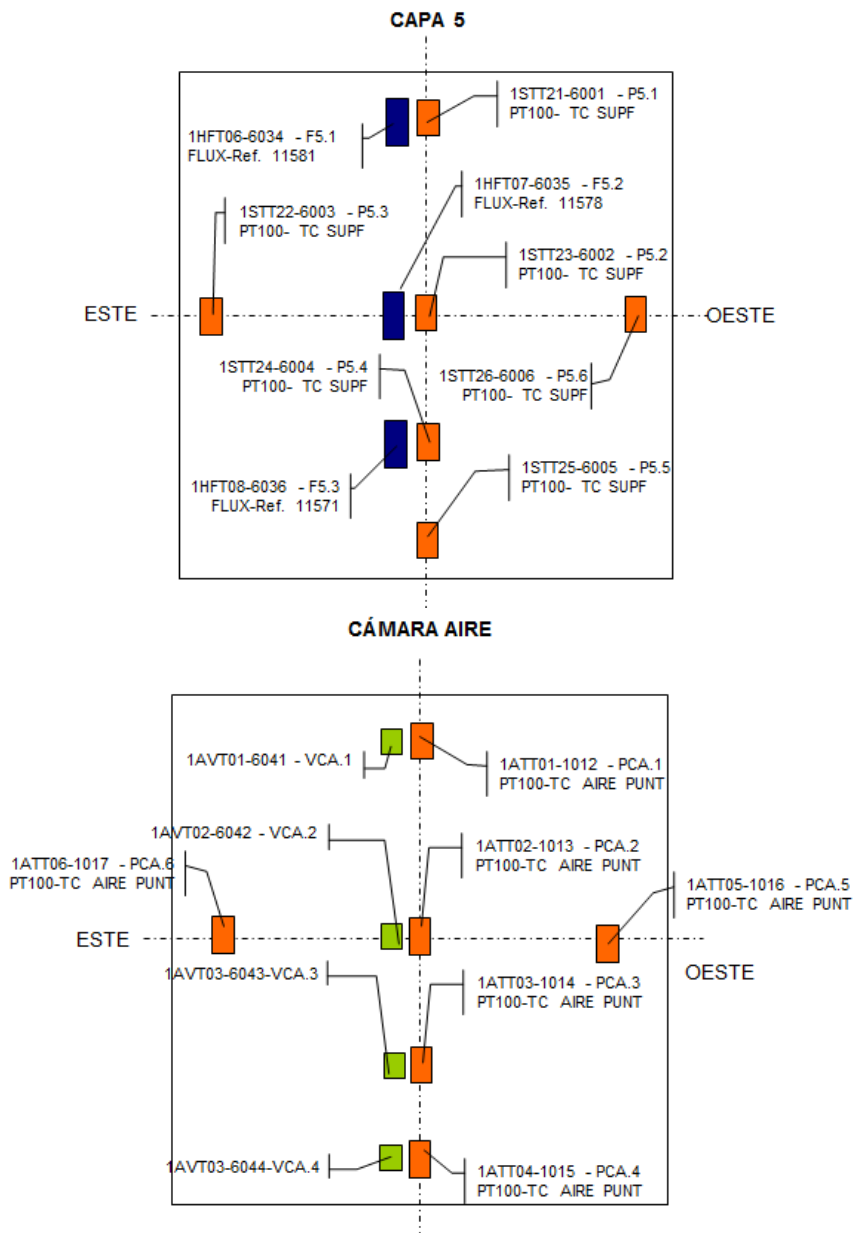


Figura C.23 – Esquema de montaje de las sondas en la muestra de fachada ventilada ligera

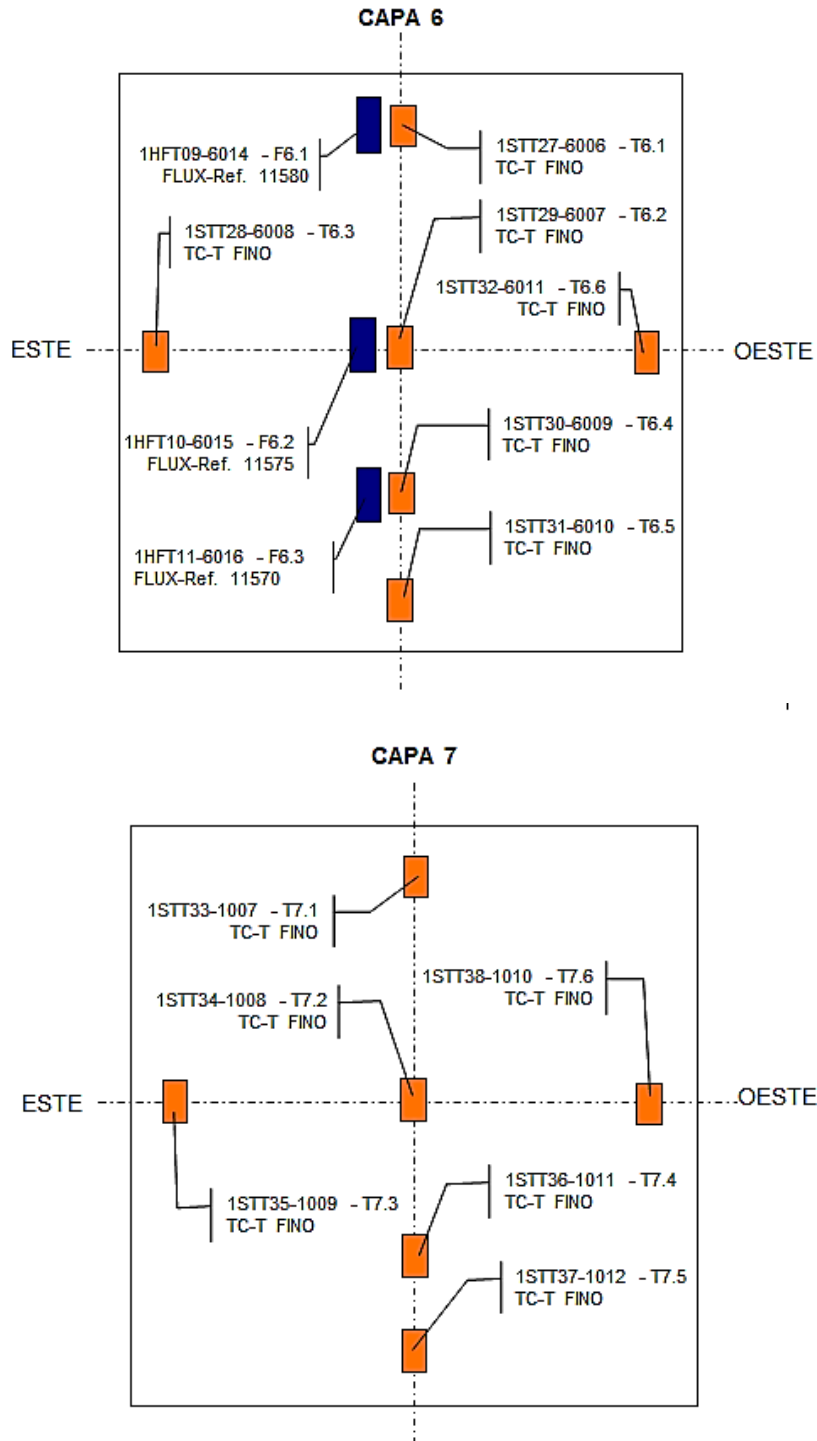


Figura C.24 – Esquema de montaje de las sondas en la muestra de fachada ventilada ligera

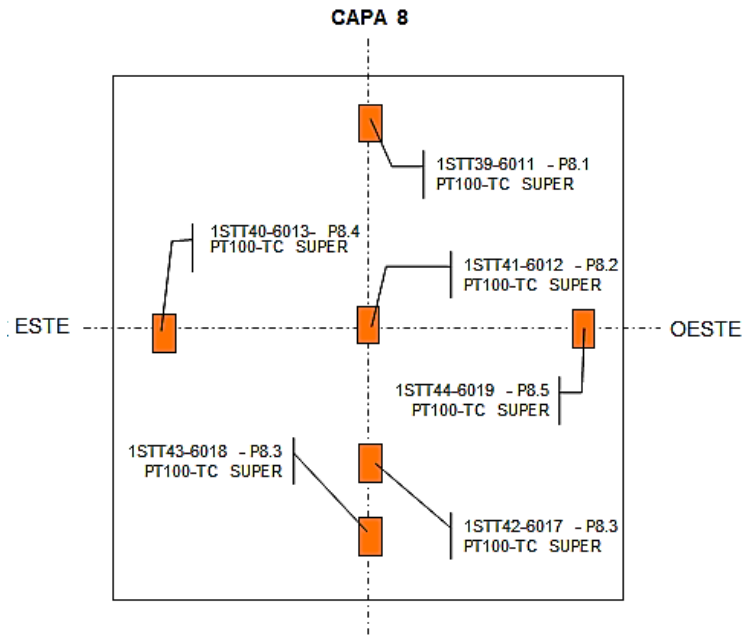


Figura C.25 – Esquema de montaje de las sondas en la muestra de fachada ventilada ligera

C.3.2 Datos experimentales ensayo de contraste

En la Figura C.26 y en la Figura C.27 se recogen los datos correspondientes a las condiciones ambientales durante el periodo de ensayo de contraste.

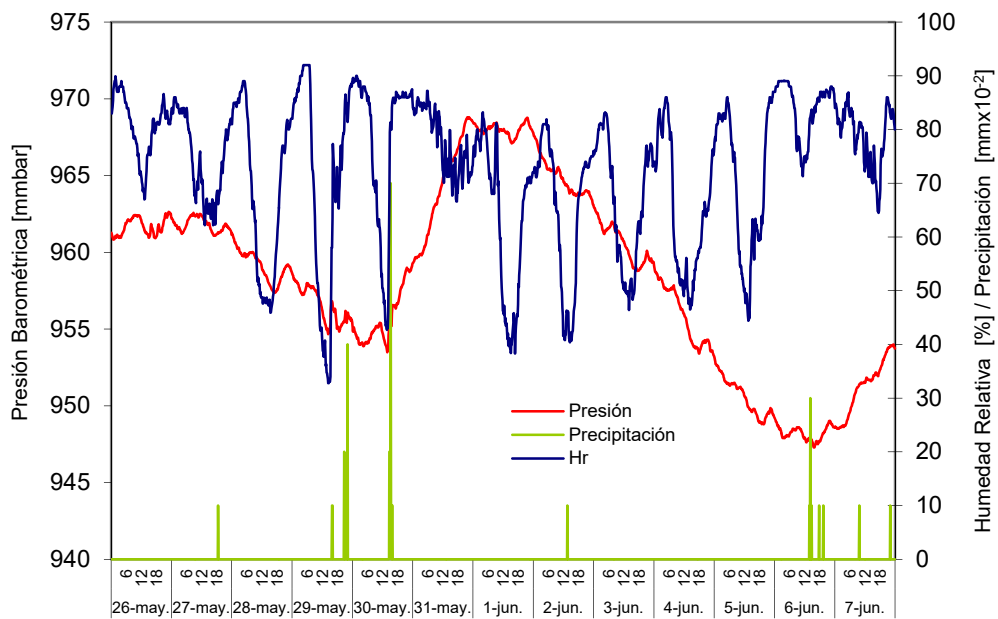


Figura C.26 – Condiciones ambientales en el ensayo de la fachada ventilada ligera periodo de contraste

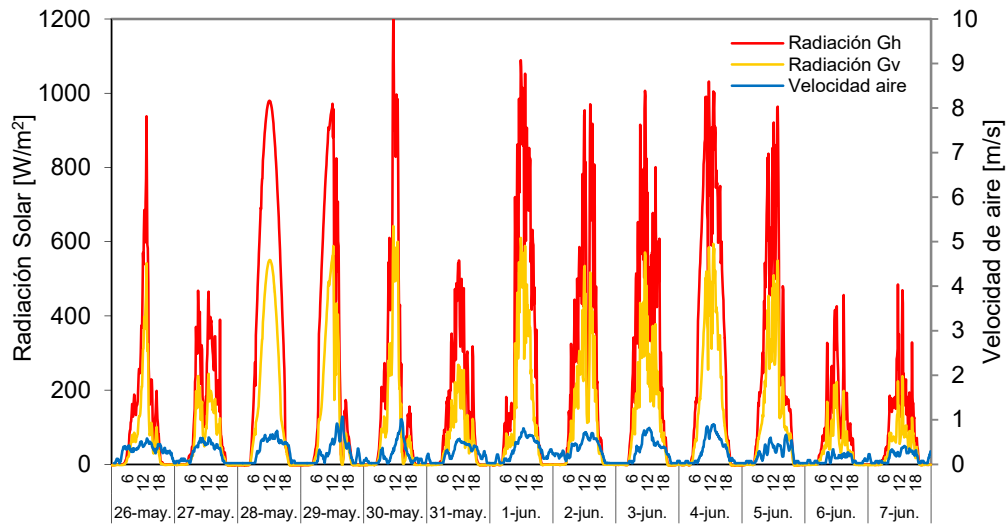


Figura C.27 – Radiación solar y velocidad de viento durante el ensayo de la fachada ventilada ligera

En la Figura C.28 se muestra la potencia inyectada en la sala de ensayo mediante la rutina de control y la evolución de las temperaturas interiores respecto a la temperatura de ambiente.

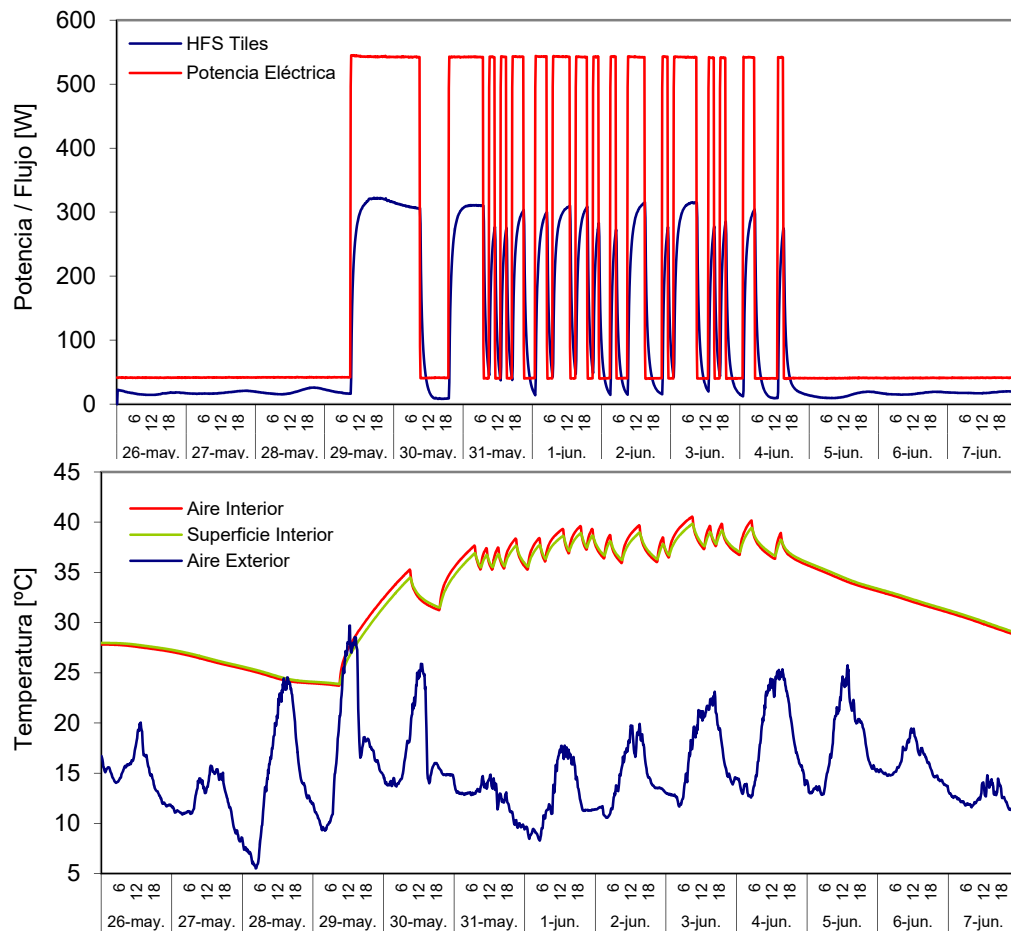


Figura C.28 – Condiciones de la sala de ensayo para la fachada ventilada ligera en el periodo de contraste

Para el periodo de contraste se modifica la rutina de ensayo, en este caso se aplica la rutina PRBS, de esta se dispone de más información sobre el comportamiento de la fachada ventilada, y si el modelo de convección es sensible al comportamiento en frecuencia de las excitaciones. En la Figura C.29 se verifica la homogeneidad de las temperaturas de aire y superficie interior de la sala de ensayos para el periodo de contraste, así como el cálculo del salto medio de temperaturas entre ambientes.

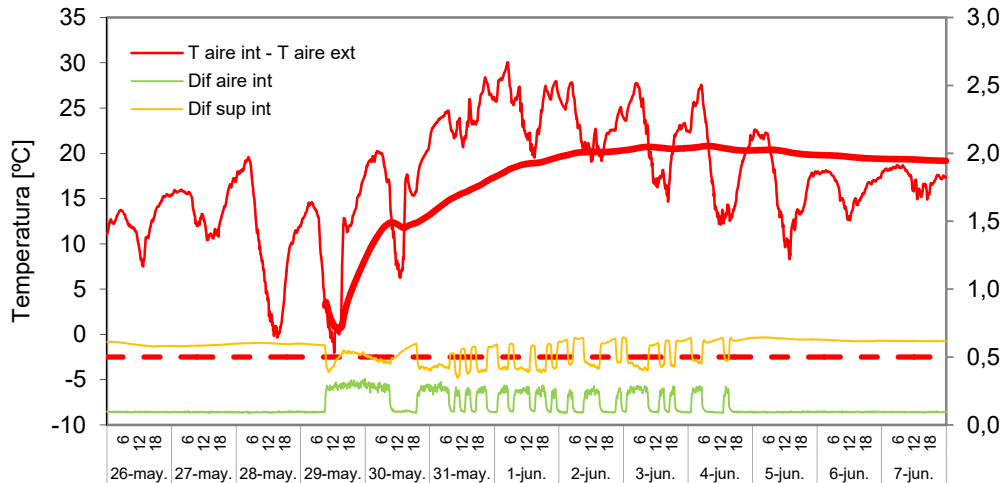


Figura C.29– Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada ligera en el periodo de contraste

En la Figura C.30 se muestran las temperaturas medias en cada una de las capas de la probeta.

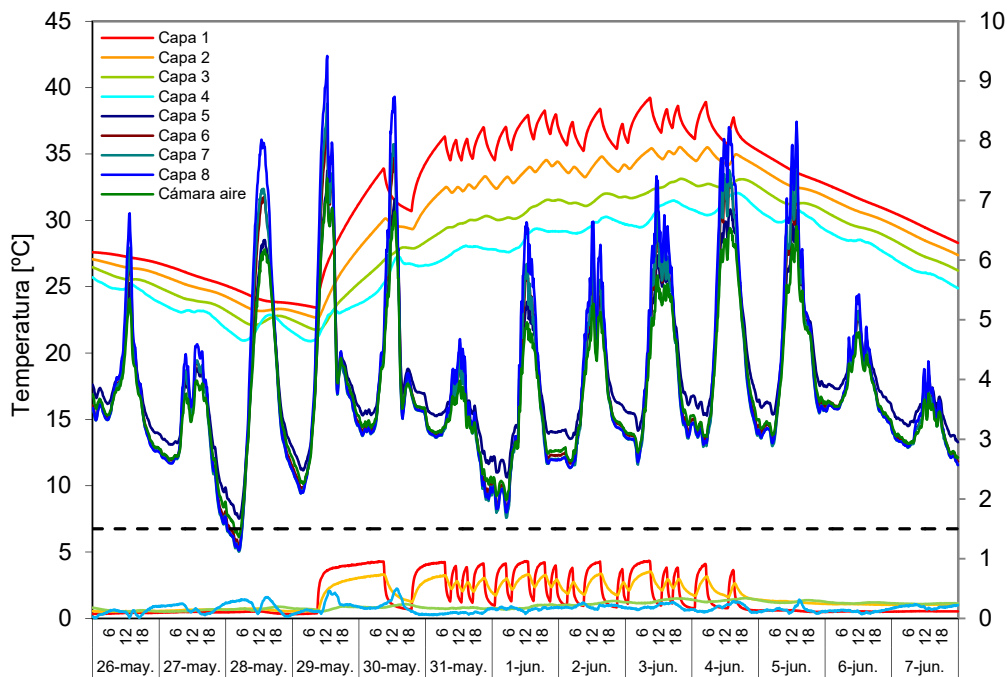


Figura C.30– Temperaturas en la probeta de fachada ventilada ligera

En la Figura C.31 se muestran los flujos puntuales medidos por las fluxímetros colocados en el punto central en las capas de mayor interés de la probeta de fachada ligera. Y en la Figura C.32 se muestran la comparativa de flujos medidos en la superficie interior de la muestra para dicho punto central respecto a flujo medido en las zonas de borde de la probeta. Esta comparativa permite evaluar el efecto de dichas zonas.

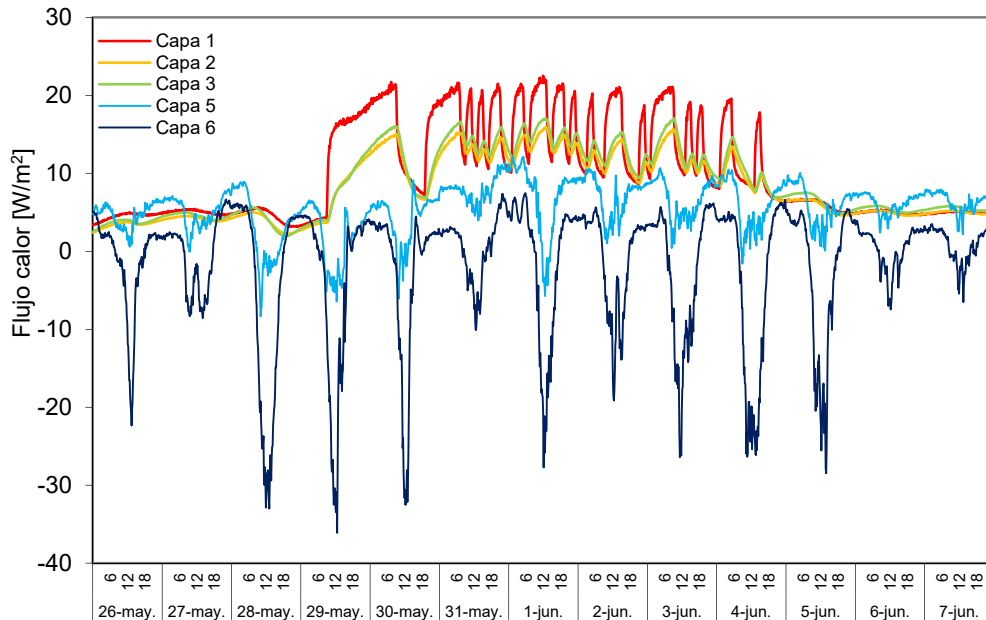


Figura C.31– Flujos de calor puntuales medidos en la zona central de la fachada ventilada ligera para cada una de las capas más representativas durante el periodo de contraste

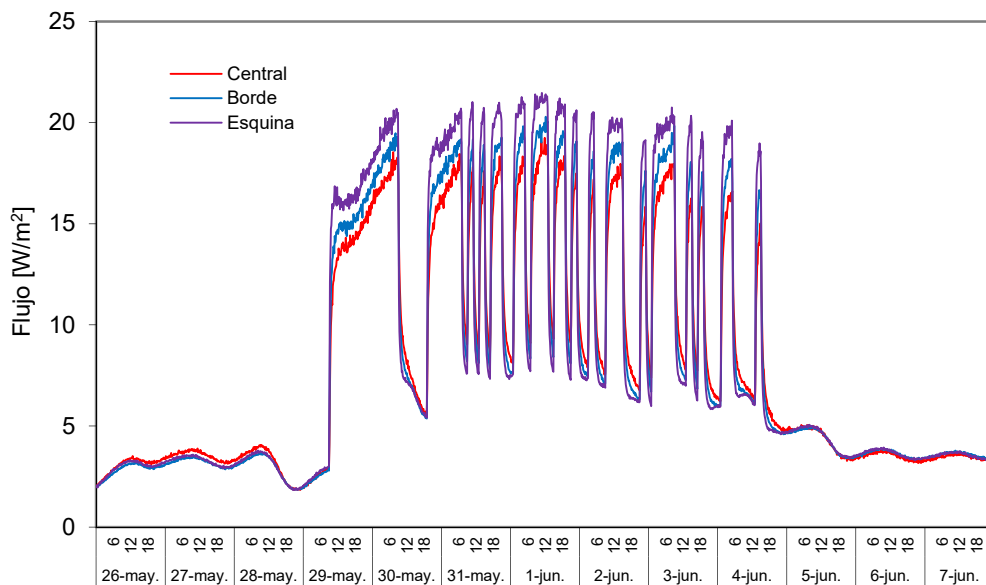


Figura C.32– Flujos superficiales en la cara interior, capa 1, para la muestra de fachada ventilada ligera

En la Figura C.24 se muestra la evolución de temperaturas en altura para la cámara de aire y las superficies que la conforman.

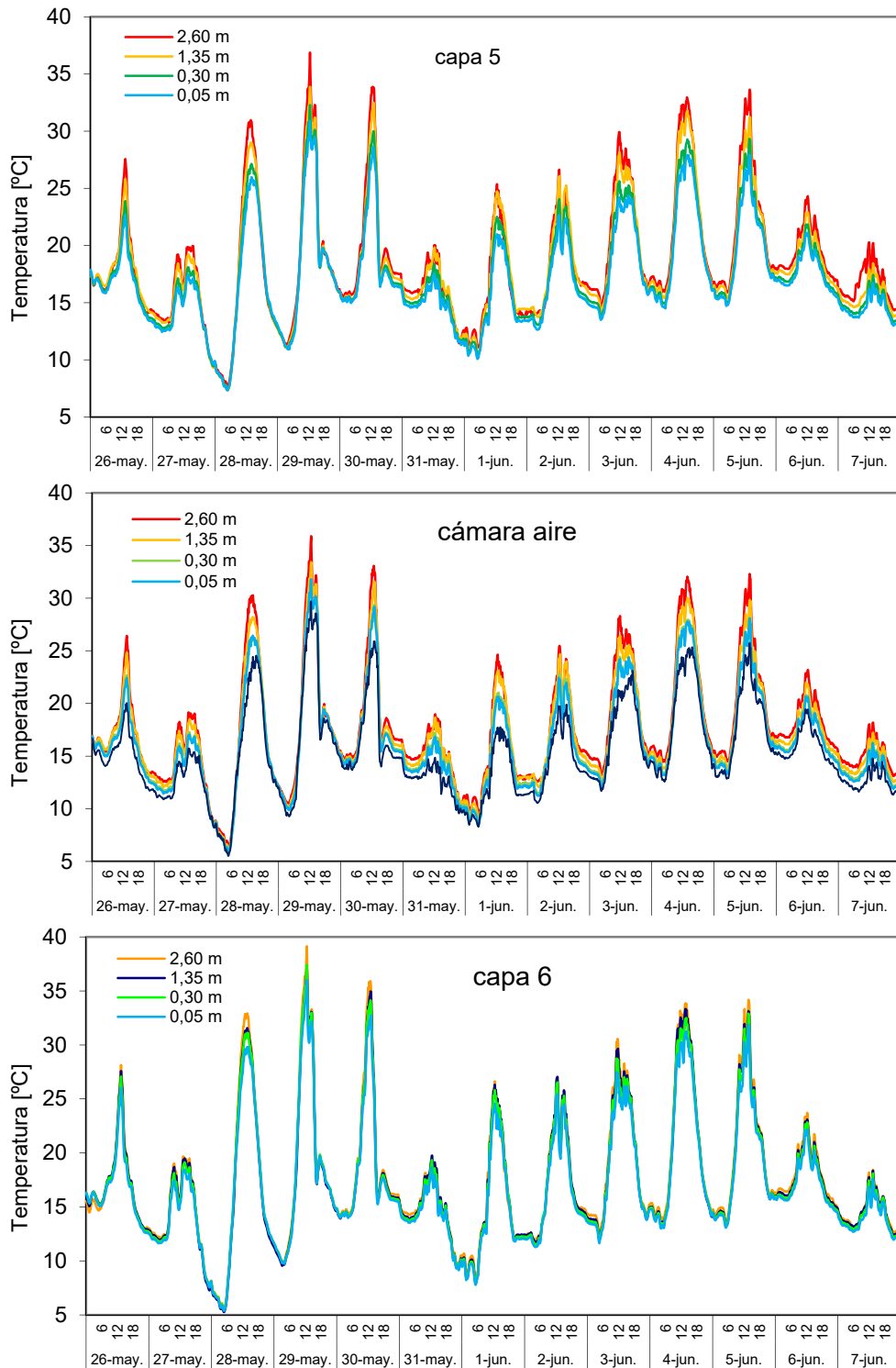


Figura C.24 – Temperaturas en función de la altura en el eje central de la cámara ventilada

En la Figura C.26 se muestra la velocidad de aire medida en la cámara ventilada por los termoanemómetros en función de la altura. En la Figura C.27 se muestran los flujos intercambiados por las superficies que conforman la cámara de aire registrados por los fluxímetros instalados.

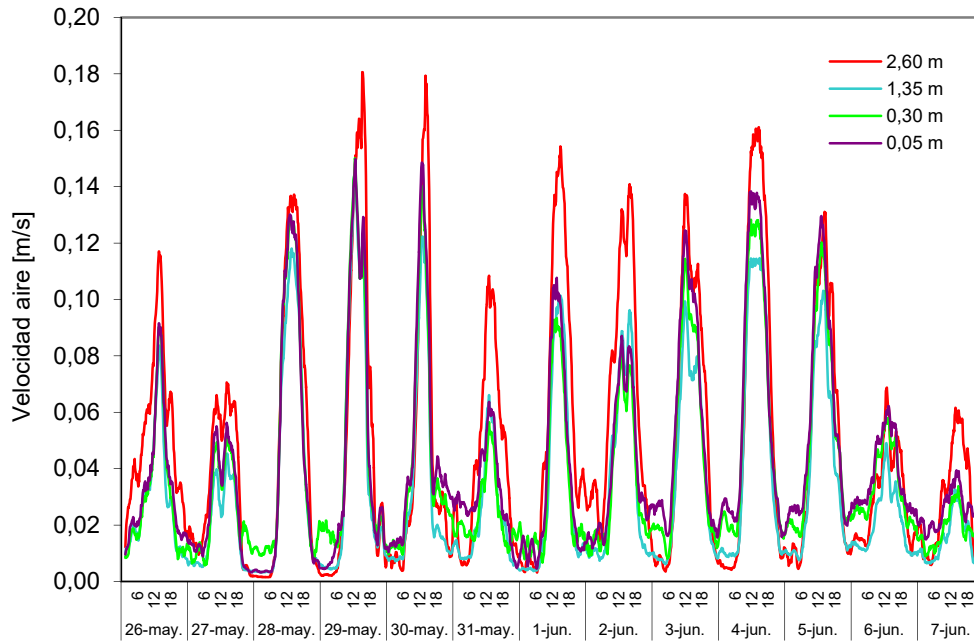


Figura c.25 – Velocidades de aire en la cámara ventilada para el eje central en función de la altura

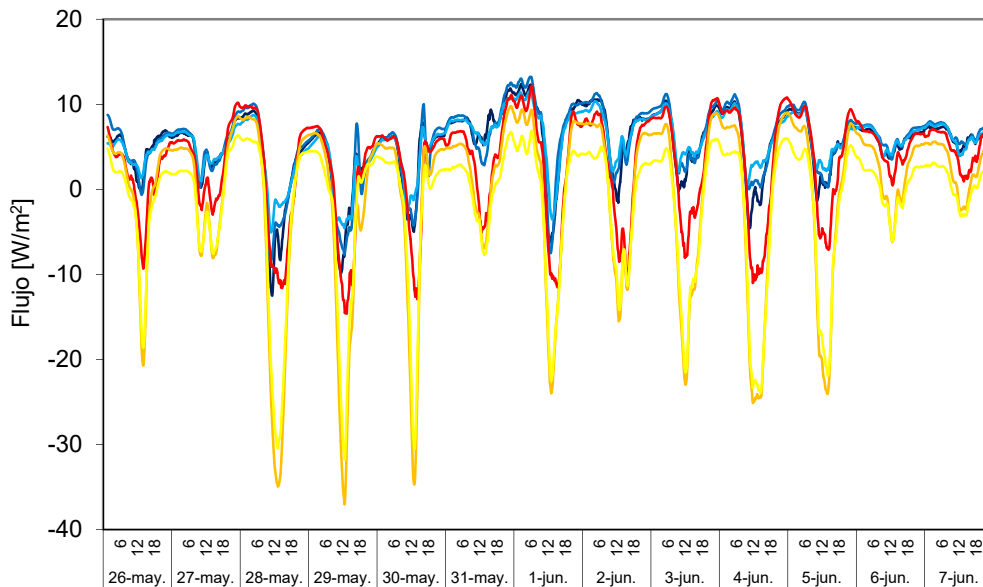


Figura c.26 – Flujos de calor puntuales medidos en las superficies que conforman la cámara ventilada para el eje central en función de la altura

C.4 Fachada ventilada pesada

De la experiencia adquirida mediante el ensayo de la probeta de fachada ventilada ligera se plantean modificaciones sobre la instrumentación instalada en la muestra de fachada pesada. Un claro ejemplo es el empleo de sondas de medida de diferencia de presión, de cara a caracterizar las pérdidas de carga en las zonas de entrada y salida de la cámara ventilada. Esta variable se ha mostrado de gran necesidad a la hora de ajustar los modelos CFD. Así mismo, se añade al grupo de sondas una termopila para medir con mayor precisión el salto de temperaturas que se produce dentro de la cámara de aire, junto con la medida de la homogeneidad de dicho salto a lo largo de la toda la muestra, lo que permite valorar la fiabilidad de la hipótesis de flujo bidimensional dentro de la probeta. A continuación se muestran los esquemas de instrumentación instalados en la probeta y los datos correspondientes al periodo de contraste realizado.

C.4.1 Instrumentación de la muestra

En la Figura C.27 se muestra un esquema constructivo de la probeta de fachada ventilada pesada con la descripción de cada capa que la conforma. En la Tabla C.4 se recoge el número y tipología de sensores instalados.

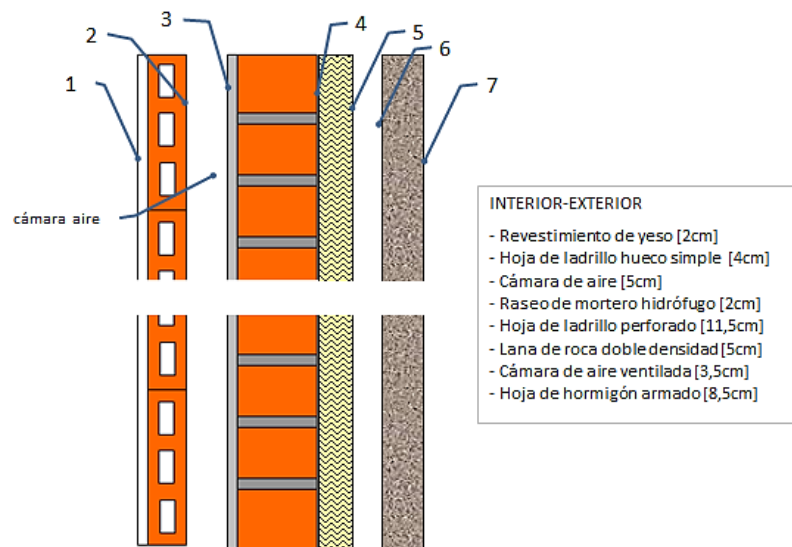


Figura C.27 – Solución constructiva de la fachada ventilada pesada

MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES						
		CAPA 1	CAPA 2-3	CAPA 4	CAPA 5-6	CA	CAPA 7	
MURO BASE + FV P	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	5		6	10	5
	Temperatura	Termopila tipo T			5			
	Dif Temperatura	Temopila tipo T 10 puntas					1	
	Flujo de calor	Ahlborn FQA-0801-H	3	1				
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1					4	
	Dif Presión	Ahlborn FD8612DPS/APS					3	

Tabla c.4 – Sensores instalados en la probeta de la fachada ventilada pesada

En la Figura C.28 y en la Figura C.29 se muestran los esquemas de montaje de los sensores para las capas nuevas asociadas a la probeta de fachada ventilada pesada.

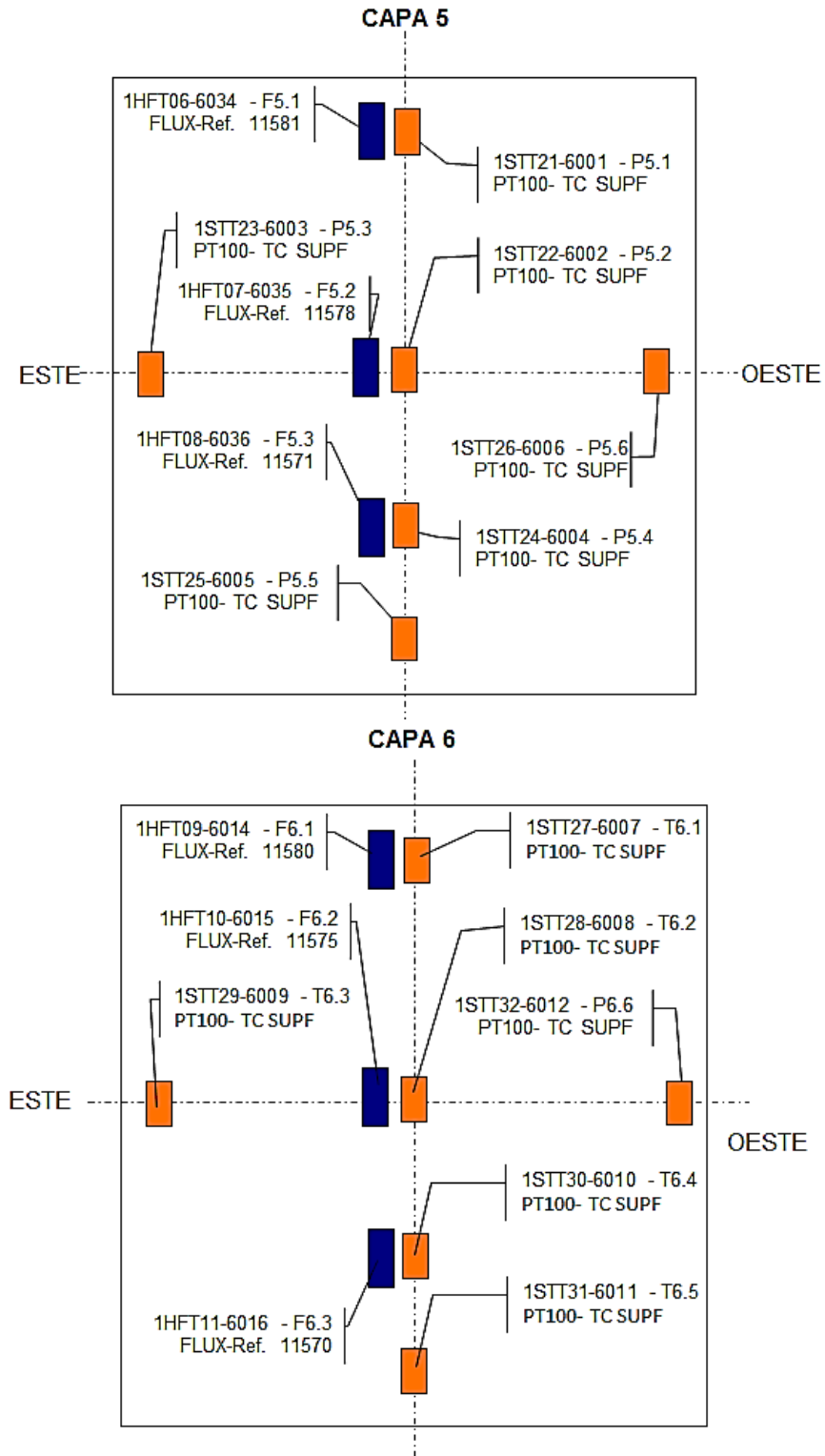


Figura C.28 – Instrumentación instalada en la fachada ventilada pesada

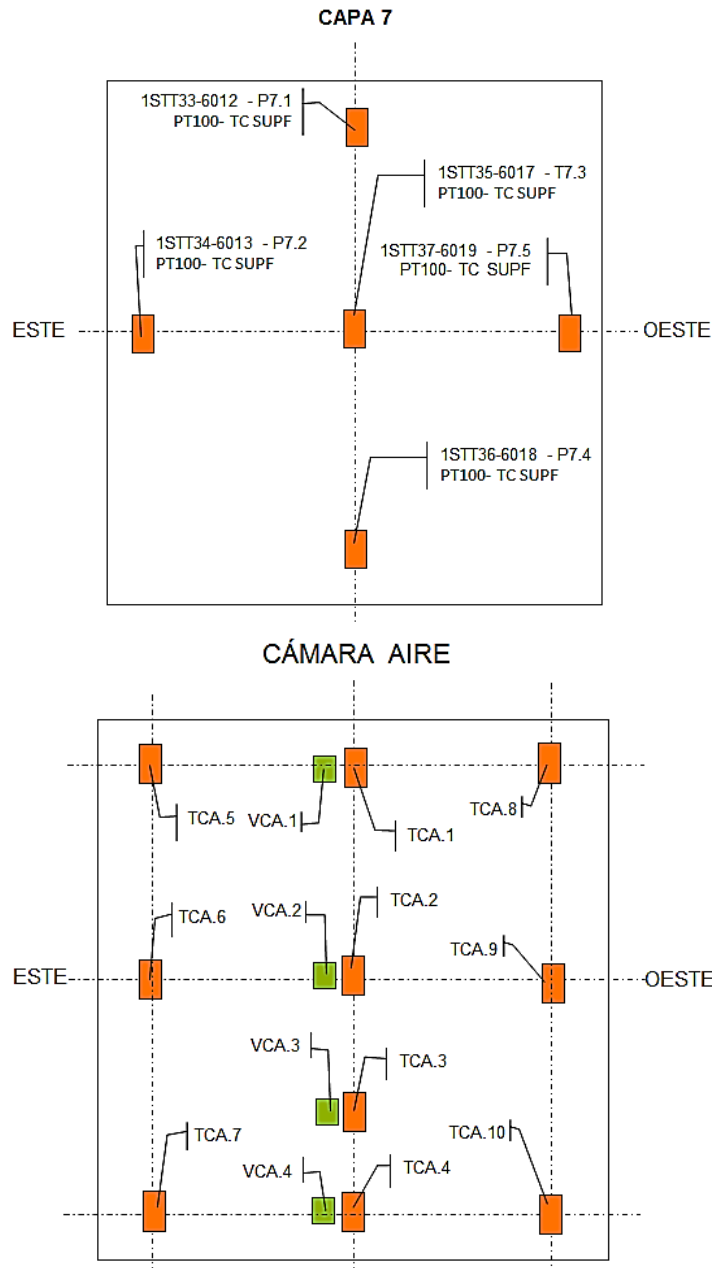


Figura C.29 – Instrumentación instalada en la fachada ventilada pesada

En el esquema correspondiente a las sondas de la cámara de aire mostrado en la imagen inferior de la Figura C.29 no se ha definido la nomenclatura total de la instrumentación ya que la imagen sería compleja de visualizar, por tanto, se ha indicado la definición propia del ensayo que se emplea en el posterior análisis específico de datos. En la Figura C.30 se muestra el esquema de montaje de la termopila y de las tres sondas de presión diferencial aprovechando el montaje de manguitos de presión instalados para medir la pérdida de presión en la entrada y en la salida respecto al exterior. El montaje de manguitos se realiza de esta forma ya que los sensores empleados son de presión diferencial, lo que permite ampliar la precisión respecto a la medida de las presiones absolutas y la resta posterior.

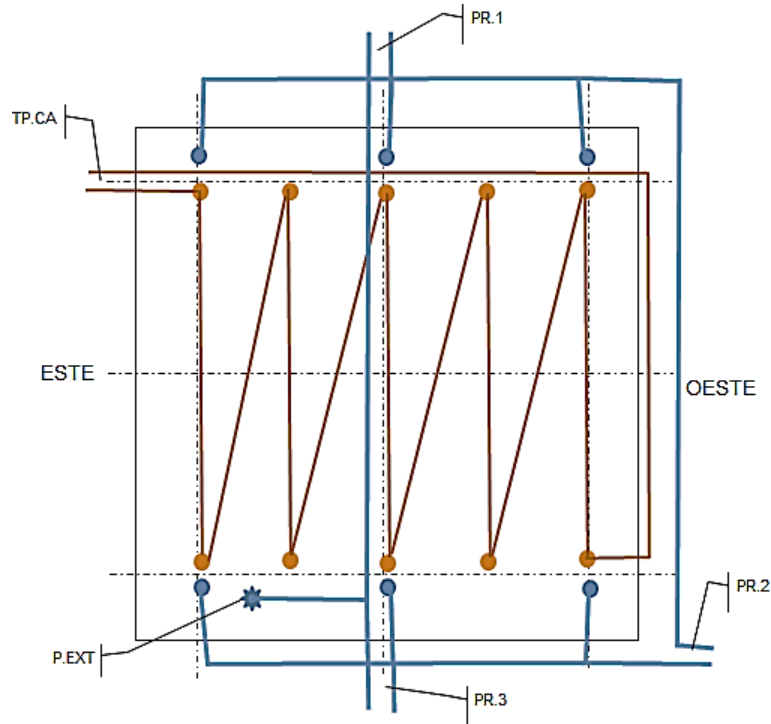


Figura C.30 – Montaje termopila y manguitos de presión en la probeta de fachada ventilada pesada

C.4.2 Datos experimentales ensayo de contraste

En la Figura C.31 y en la Figura C.32 se muestran las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolla el periodo de ensayo que se emplea como contraste para el modelado de la muestra de fachada ventilada pesada.

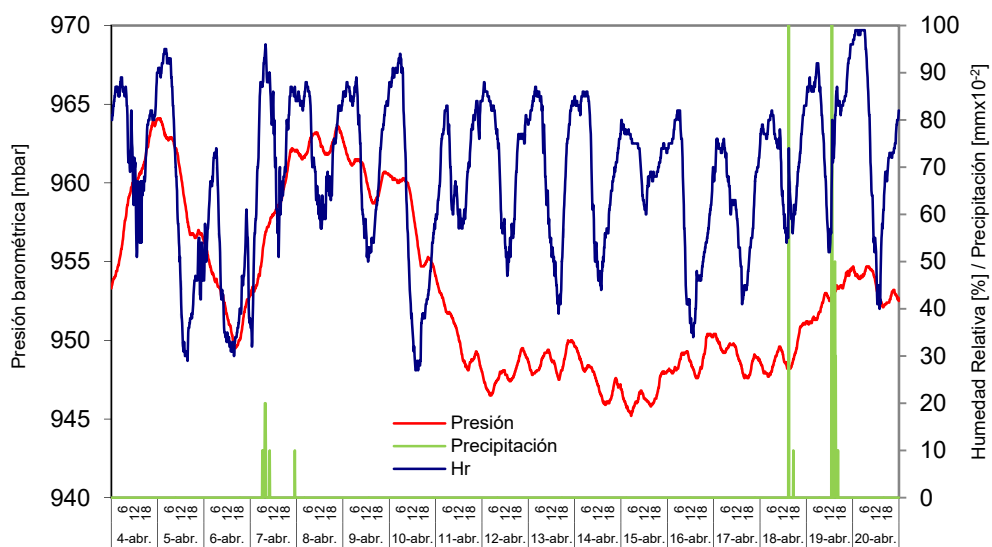


Figura C.31 – Condiciones ambientales ensayo de fachada ventilada pesada durante periodo de contraste

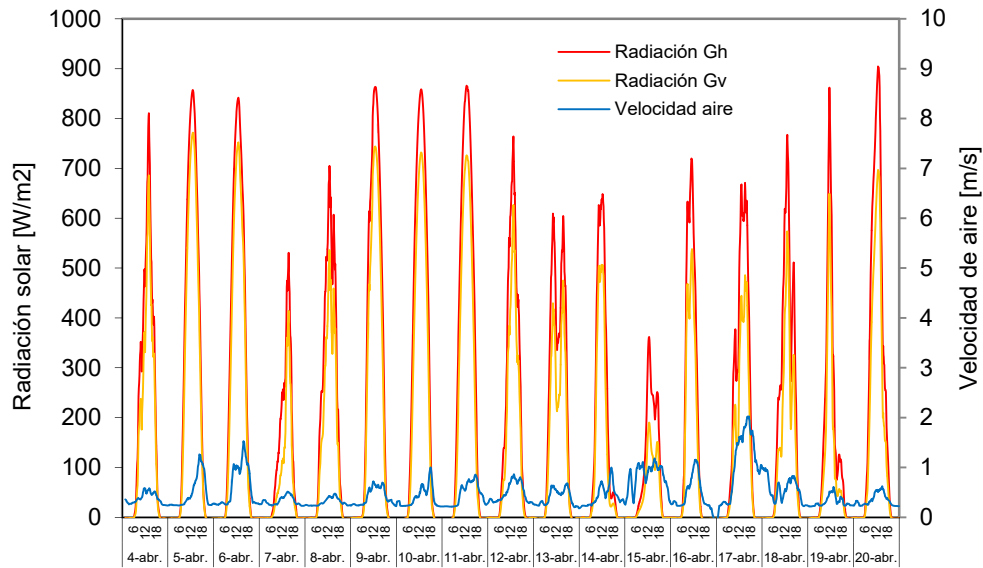


Figura C.32 – Radiación solar y velocidad de viento durante ensayo de contraste fachada ventilada pesada

En la Figura C.33 se muestra la rutina de ensayo y el flujo de calor intercambiado por la envolvente. En este caso no se aplica una de las rutinas de ensayo estándar sino que se emplea una excitación escalón. Este cambio se realiza debido a la elevada inercia de la muestra, y se busca el estudio de la respuesta a escalón. Se aprecian dos picos singulares en la señal de flujo de calor para los días 14 y 16 de abril. Esto se debe a que, por razones ajenas al estudio, se entró en la sala de ensayos.

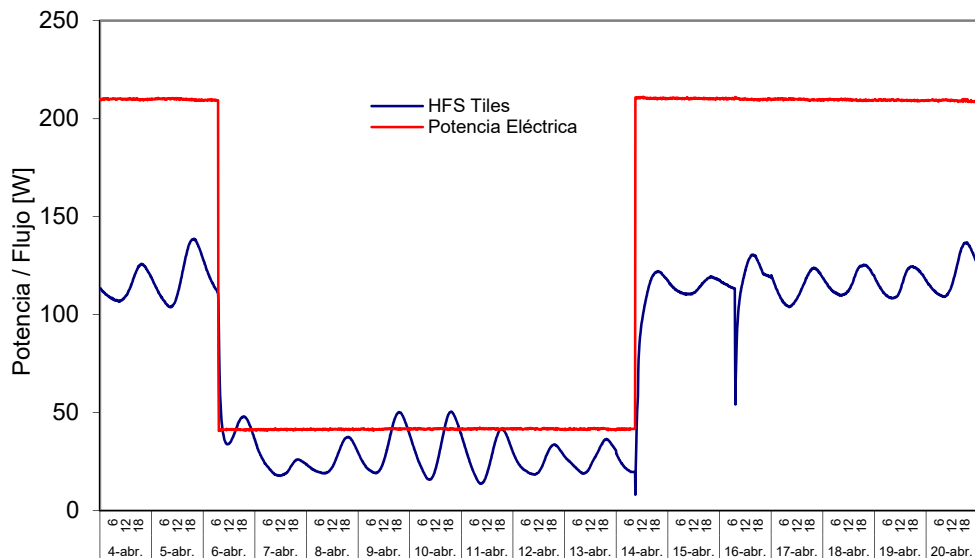


Figura C.33 – Potencia introducida y flujo de calor de la envolvente de la sala de ensayos para la fachada ventilada pesada

En la Figura C.34 y en la Figura C.35 se analizan las condiciones de temperatura de la sala de ensayos. Y en la Figura C.36 se muestra la temperatura media de cada capa junto con las diferencias máximas en las capas interiores del muro base.

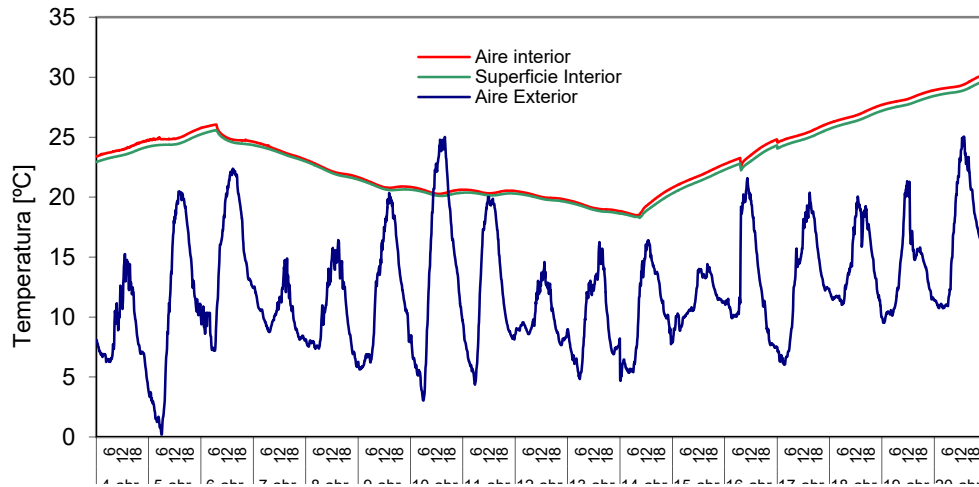


Figura C.34– Temperatura de la sala de ensayos y ambiental para la fachada ventilada pesada

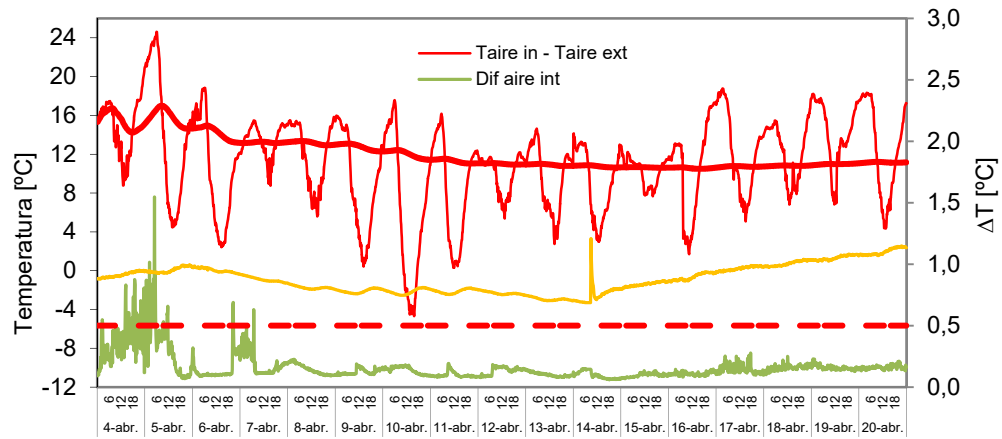


Figura C.35 – Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada pesada

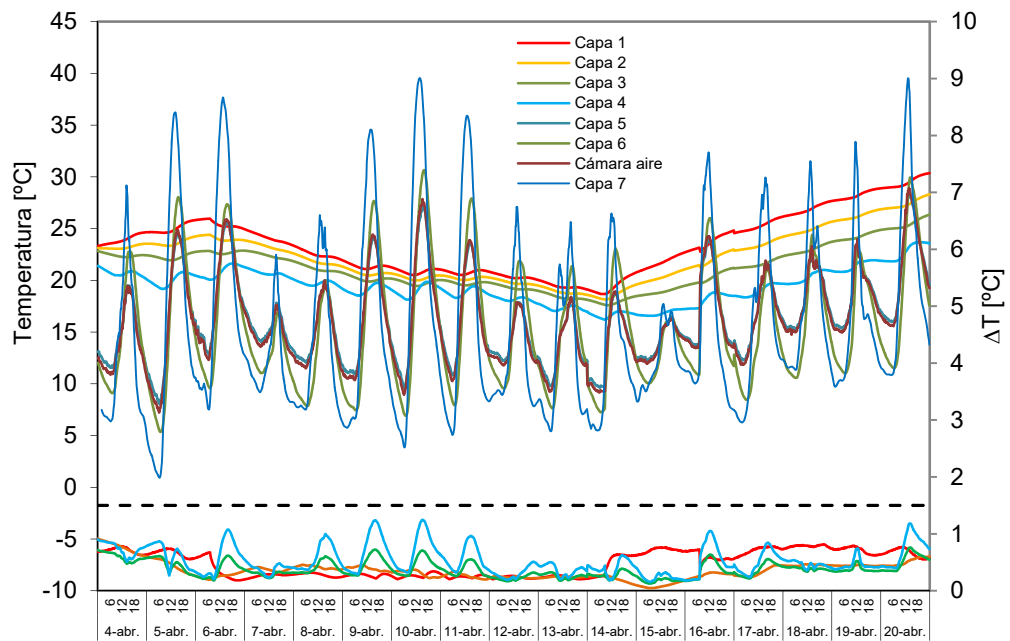


Figura C.36 – Temperaturas en la probeta de fachada ventilada pesada

Una vez analizadas las condiciones de temperatura, se evalúan los flujos de calor en la probeta. En la Figura C.37 se muestran los flujos en las capas interiores del muro de doble hoja. Y en la Figura C.38 la homogeneidad de flujos en la superficie interior de la muestra.

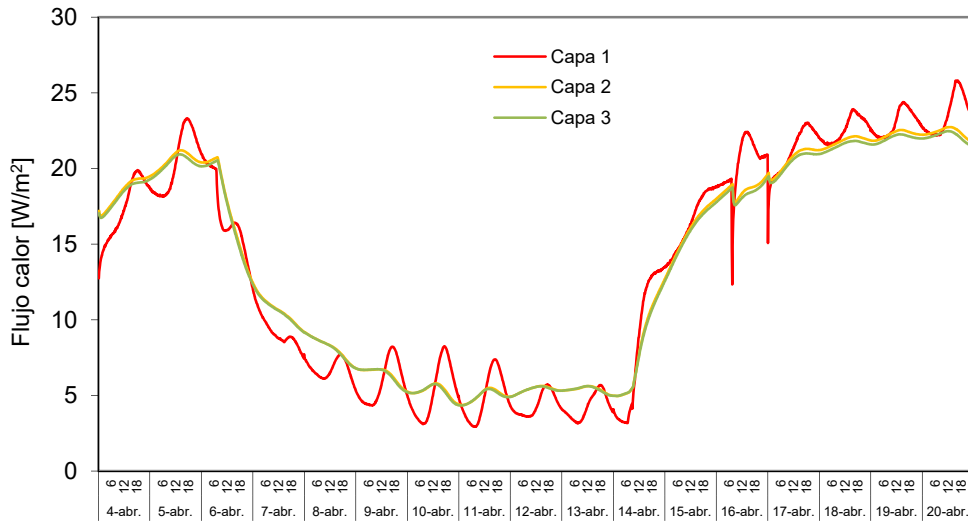


Figura C.37 – Flujos de calor puntuales medidos en la zona central del muro base en la probeta de fachada ventilada pesada

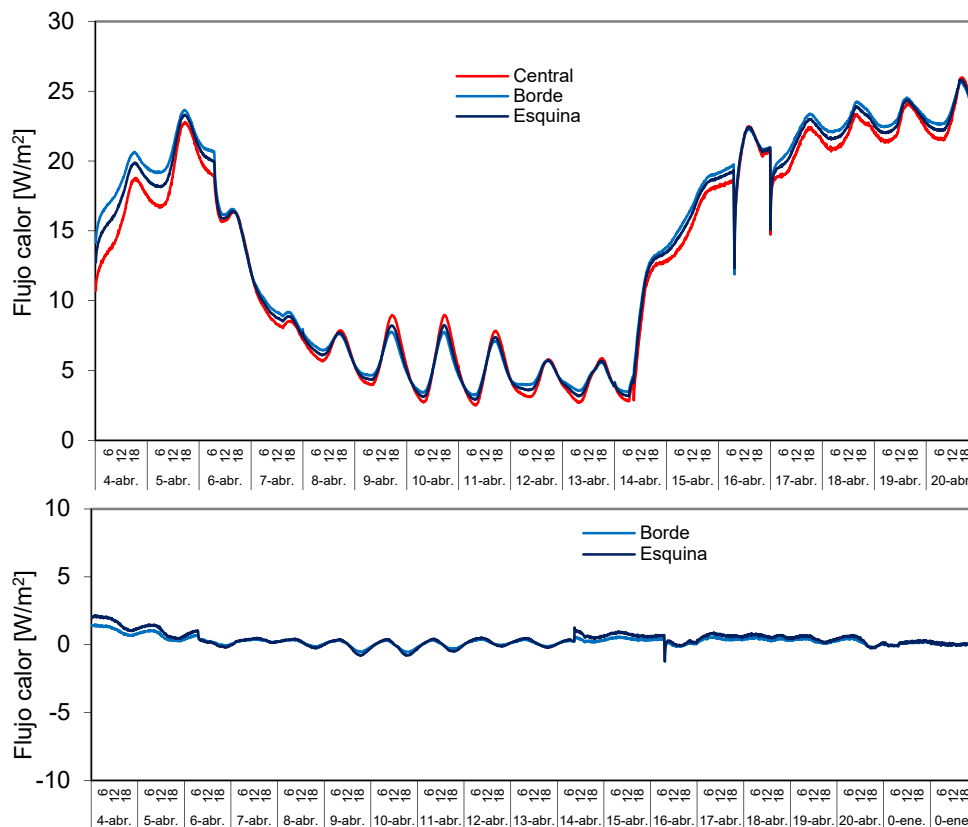


Figura C.38 – Flujos superficiales en la cara interior, capa 1, para la muestra de fachada ventilada pesada

En la Figura C.39 se muestra la evolución de las temperaturas en función de la altura en las superficies y en el aire de la cámara ventilada.

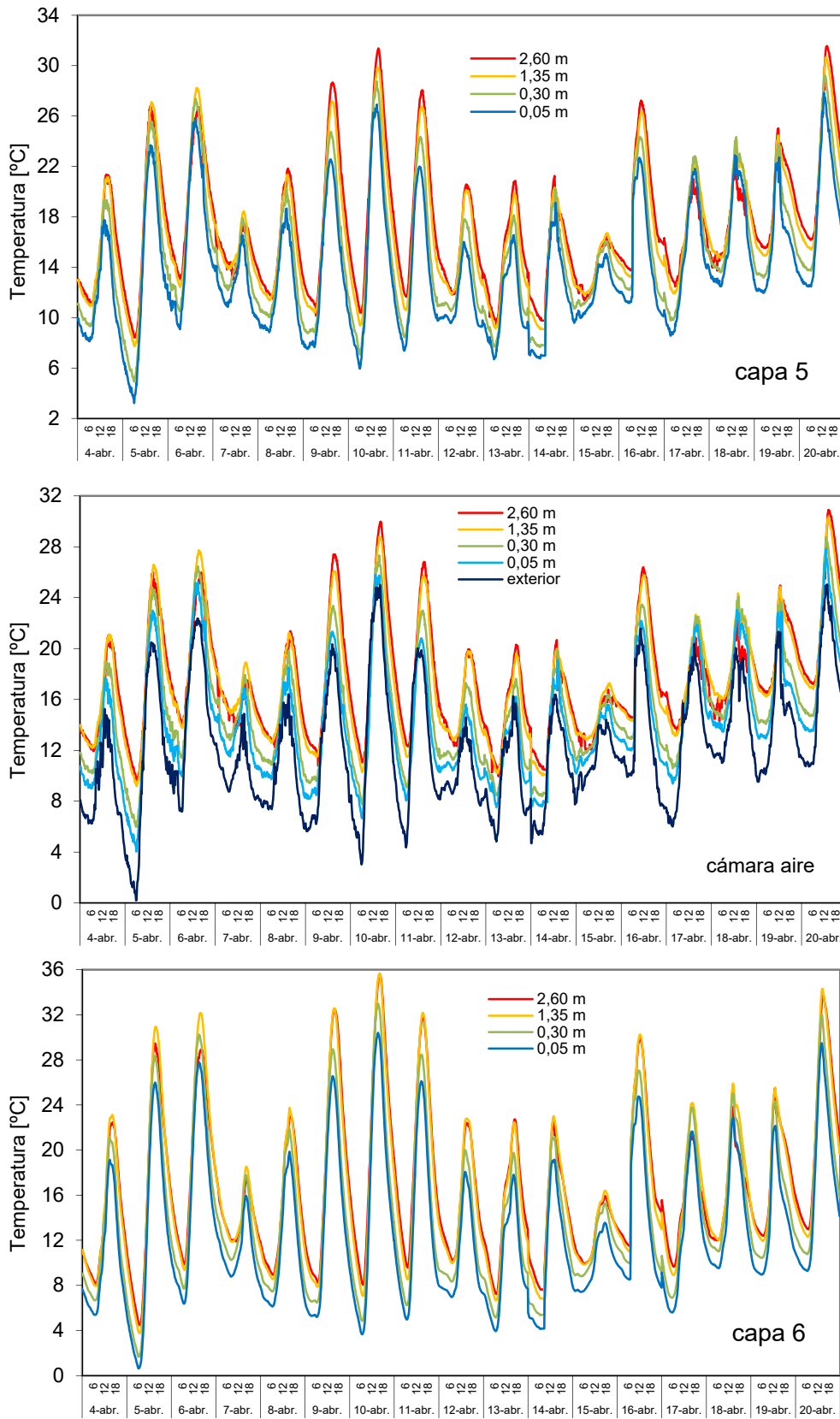


Figura C.39 –Temperatura en altura en el eje central de la cámara ventilada probeta de fachada pesada

En la Figura C.40 se muestra la comparativa entre el salto de temperatura que experimental el aire dentro de la cámara ventilada registrado por la termopila respecto a la diferencia entre las sondas de temperatura de aire instaladas en el eje central.

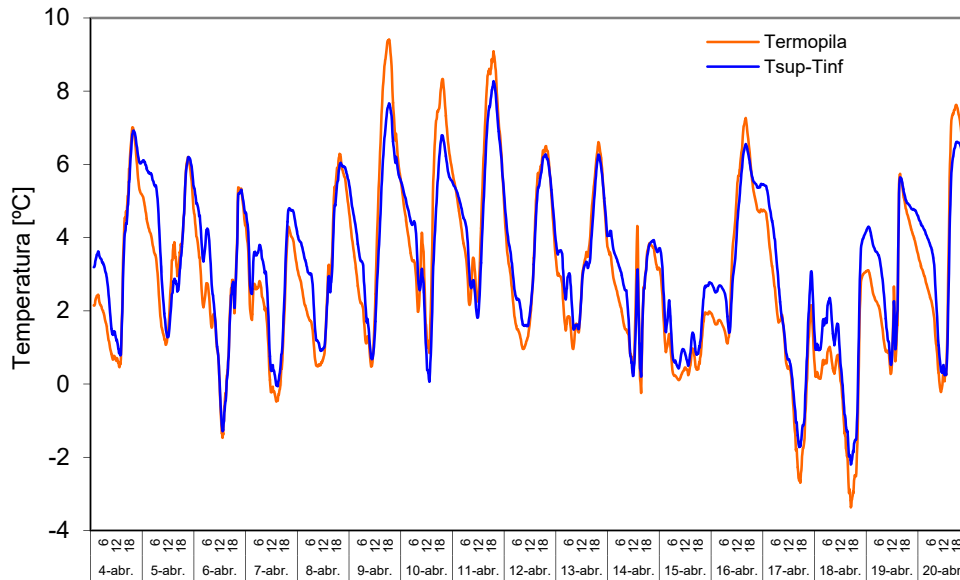


Figura C.40 – Salto de temperatura en la cámara de aire ventilada medido por la termopila y por las sondas instaladas en el eje central de la muestra

En la Figura C.41 se muestran las lecturas de velocidad del aire dentro de la cámara ventilada en función de la altura.

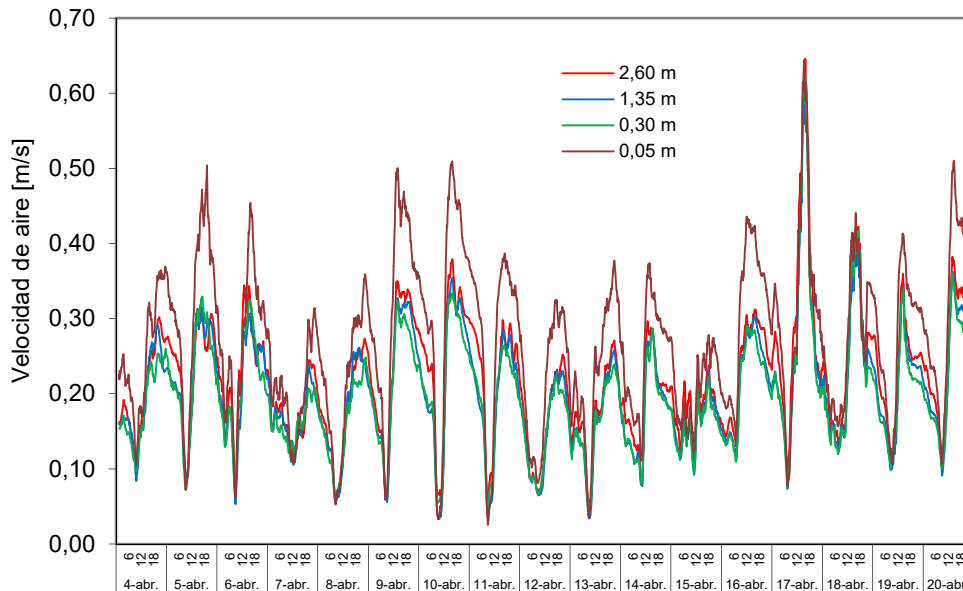


Figura C.41 – Velocidades de aire cámara ventilada para el eje central en altura para la fachada pesada

En la Figura C.42 se muestran las señales de presión diferencias que se producen en la entrada y salida de la cámara ventilada en comparación con la velocidad de viento que se produce en el exterior.

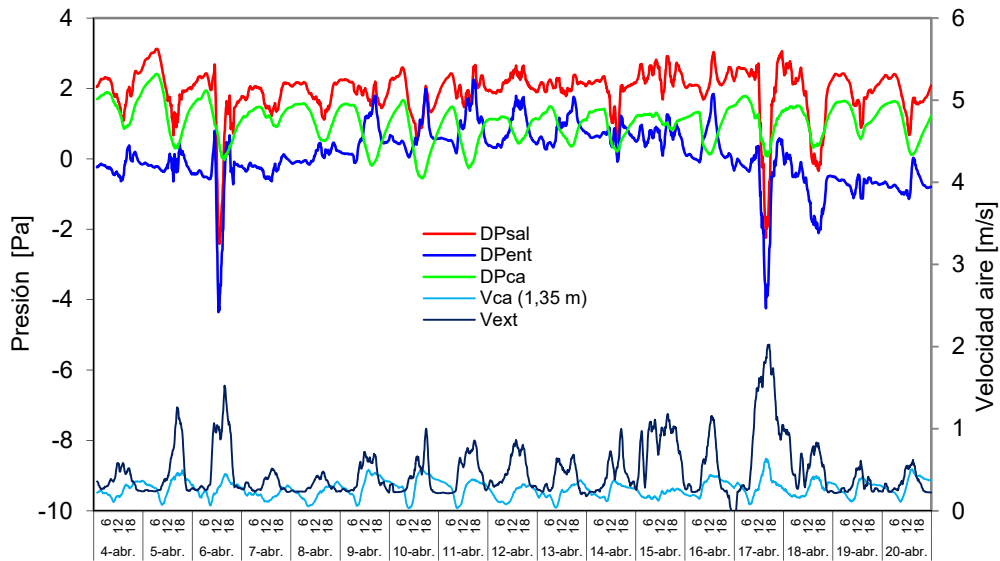


Figura C.42– Caída de presión en la fachada pesada y velocidades de aire exterior y de aire dentro de la cámara ventilada

C.5 Fachada ventilada forzada

En este caso, las propiedades de la fachada son totalmente diferentes a las de las fachadas analizadas previamente. Por un lado la construcción es ligera y de carácter industrializable, frente a la construcción más convencional de las anteriores. Y por otro lado, al forzar el movimiento de aire dentro de la cámara ventilada se obtiene un comportamiento desligado en parte de las condiciones exteriores, permitiendo además, obtener una mejor eficacia de absorción de calor por la cortina de aire. A continuación se muestra la instrumentación instalada en la probeta y los datos del ensayo de contraste.

C.5.1 Instrumentación de la muestra

Con la experiencia obtenida de los ensayos anteriores, y debido a las características propias de la muestra de fachada forzada se modifica el esquema de instrumentación empleada en el ensayo. En la Tabla C.5 se recogen el listado de sondas colocadas en cada capa de la probeta. Al disponer de menos capas se puede ampliar el número de sondas instaladas en la cámara de aire.

	MAGNITUD	CARACTERÍSTICAS	Nº SENSORES		
			CAPA 1-2-3	CA	TOLVA
FV FORZADA	Temperatura	PT100, clase A, conexión 4 hilos	5	12	1
	Dif Temperatura	Termopila tipo T 10 puntas		1	
	Velocidad aire	Ahlborn FVA-605-TA-1		1	
	Caudal aire	KIMO CP300-ALETAS DEBIMO			1
	Dif Presión	Ahlborn FD8612DPS/APS		3	

Tabla C.5 – Sensores instalados en la probeta de fachada ventilada forzada

Esto permite obtener una mejor información del comportamiento del aire en toda la superficie de la probeta, además se analiza un perfil transversal de la cámara en el punto central. En la Figura C.43 se muestra el esquema constructivo donde se puede apreciar la simplicidad constructiva. La probeta presenta sólo tres superficies, y la hoja interior se reduce a la capa de aislamiento directamente.

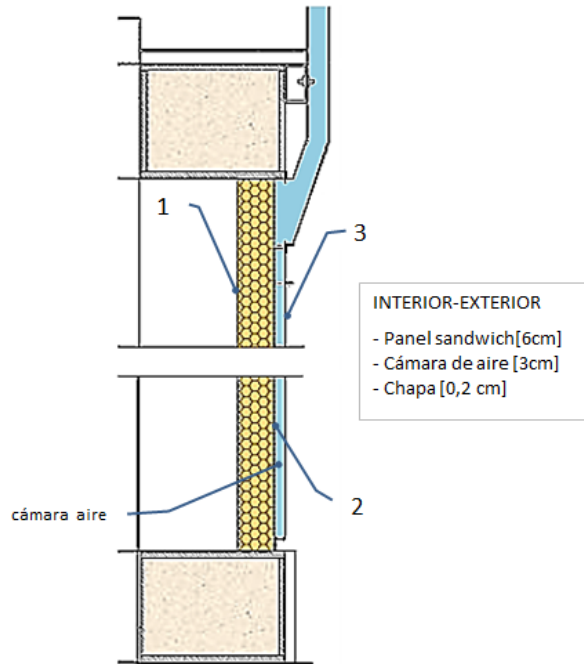


Figura C.43 – Solución constructiva de la fachada ventilada forzada

En la Figura C.44 se muestra la disposición de las sondas de temperatura instaladas en las tres capas.

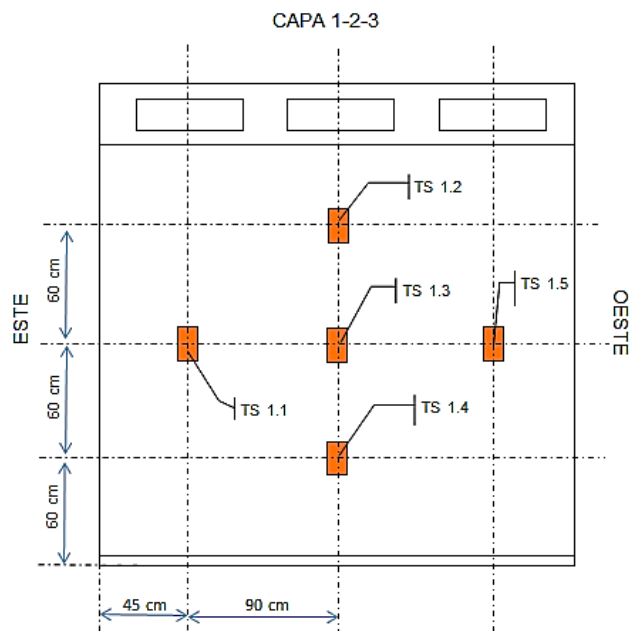


Figura C.44 – Esquema de montaje de las sondas de temperatura en las tres capas de la muestra

En la Figura C.45 se muestran las sondas colocadas en la cámara de aire ventilada, tanto de temperaturas, velocidad de aire, y diferencia de presión.

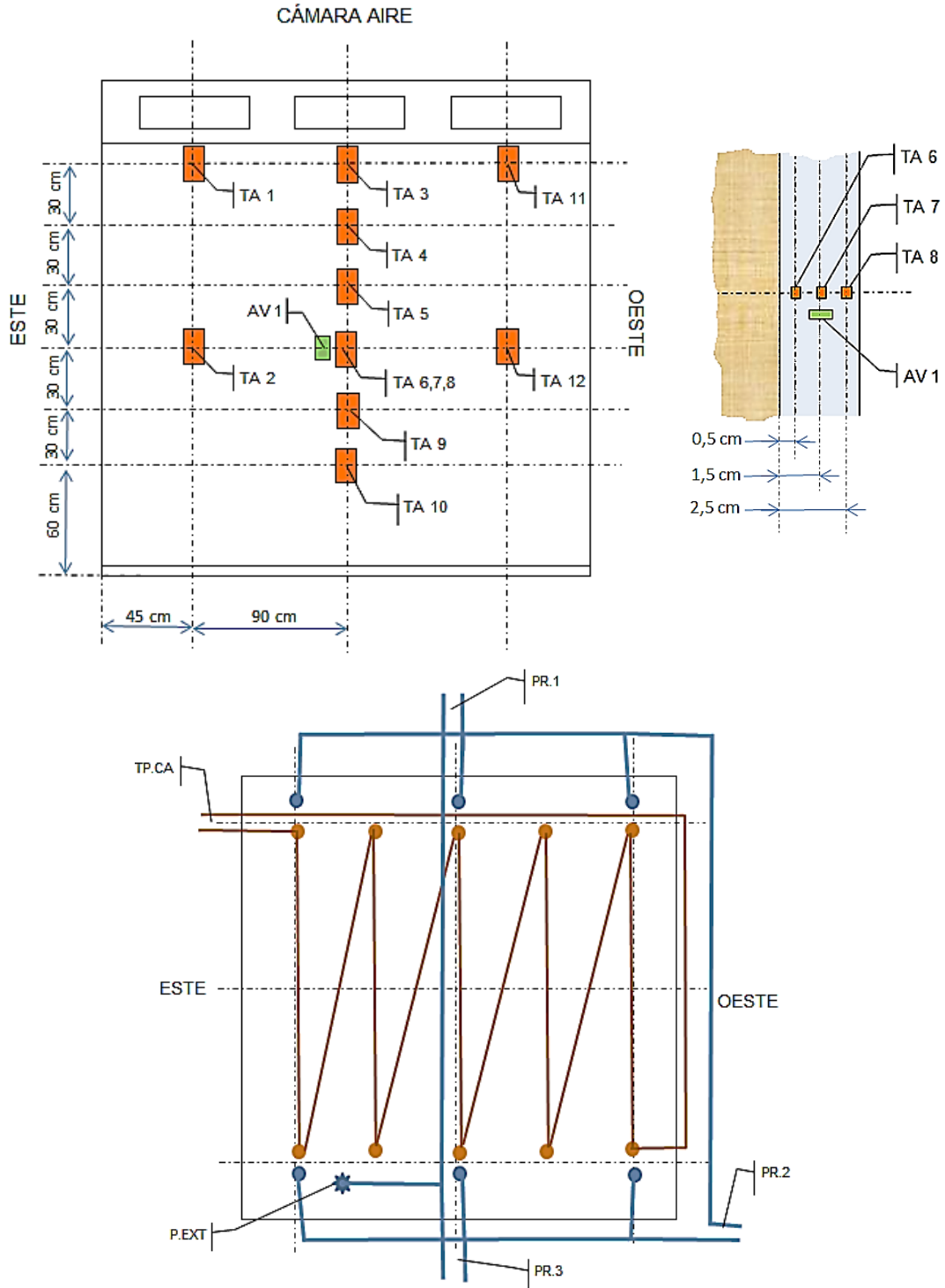


Figura C.45 – Esquema de montaje de las sondas en la cámara de aire

C.5.2 Datos experimentales ensayos de contraste

En la Figura C.46 y en la Figura C.47 se muestran los datos de las condiciones ambientales durante el periodo de ensayo de contraste realizado a la probeta de fachada ventilada forzada.

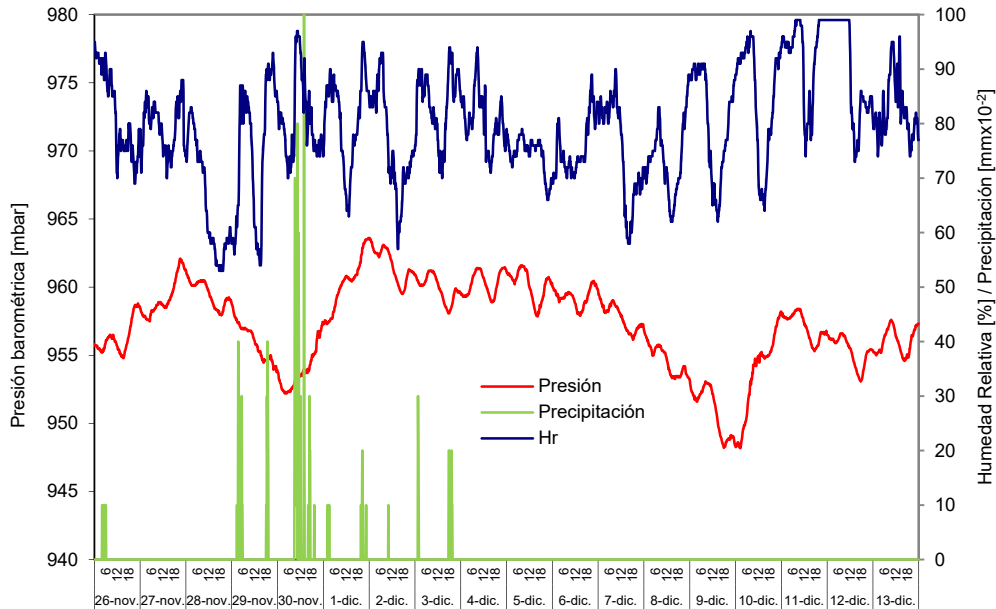


Figura C.46 – Condiciones ambientales durante el ensayo de la fachada ventilada forzada durante el periodo de contraste

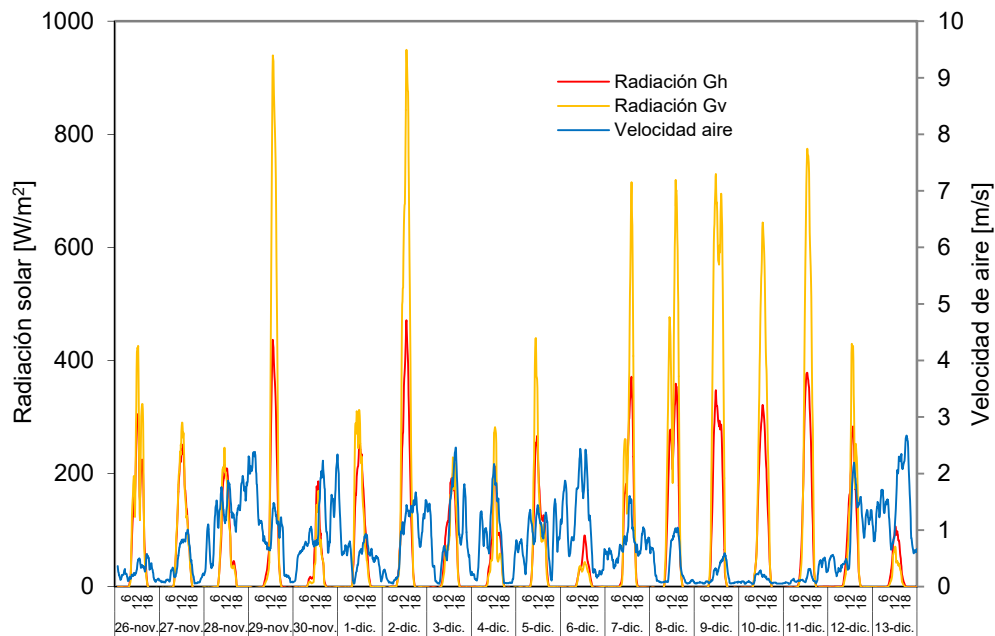


Figura C.47 – Radiación solar y velocidad de viento durante el ensayo de modelado de la fachada ventilada forzada

En la Figura C.48 y en la Figura C.49 se muestran la evolución de los flujos de calor y temperaturas en la sala de ensayos.

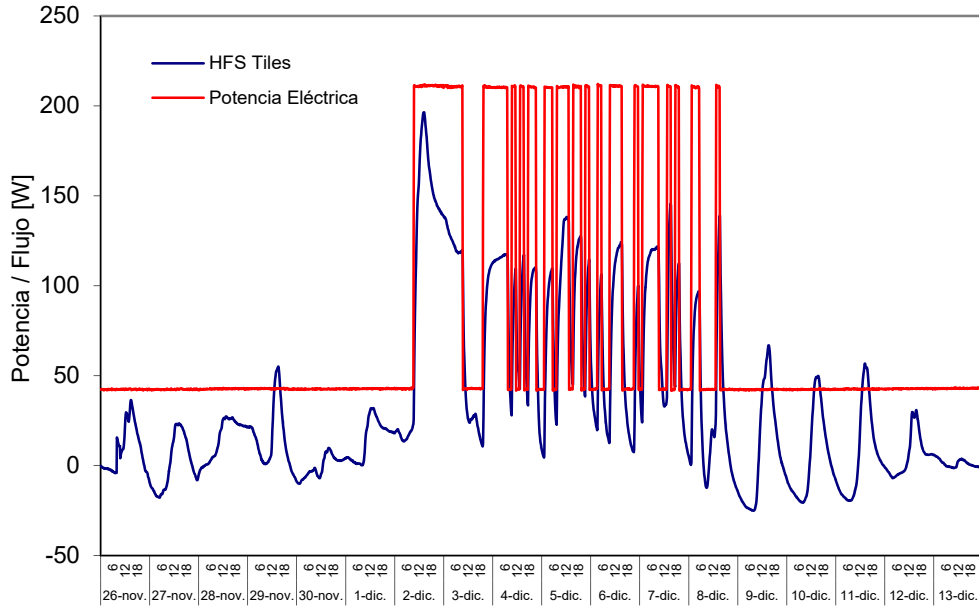


Figura C.48 – Potencia introducida y flujo de calor de la envolvente de la sala de ensayos para la fachada ventilada forzada

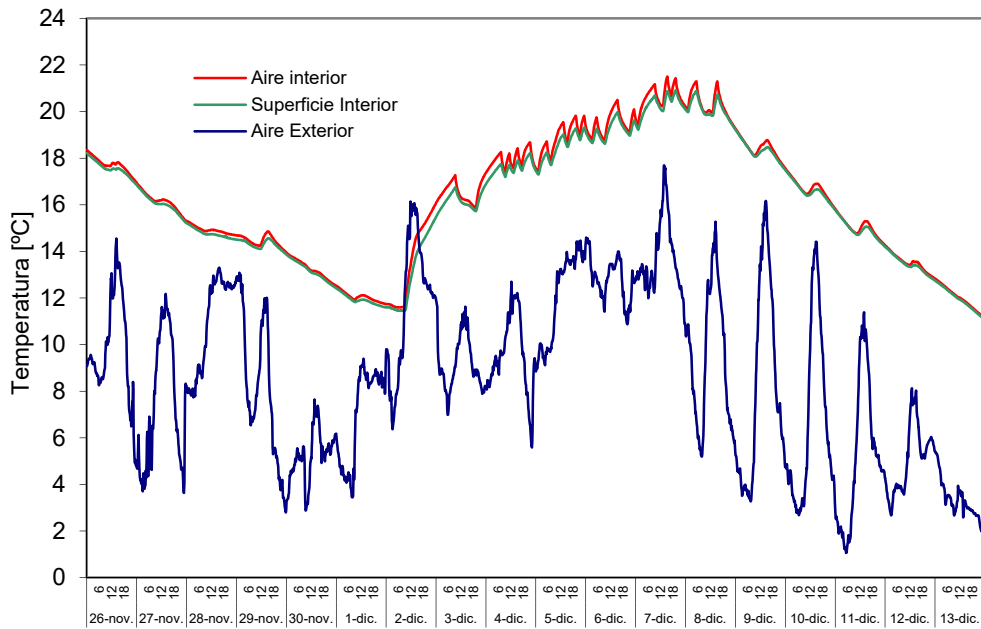


Figura C.49 – Temperatura de la sala de ensayos y ambiental para la fachada ventilada forzada

En la Figura C.50 se analiza la homogeneidad de temperaturas de la sala de temperaturas y el salto entre ambientes.

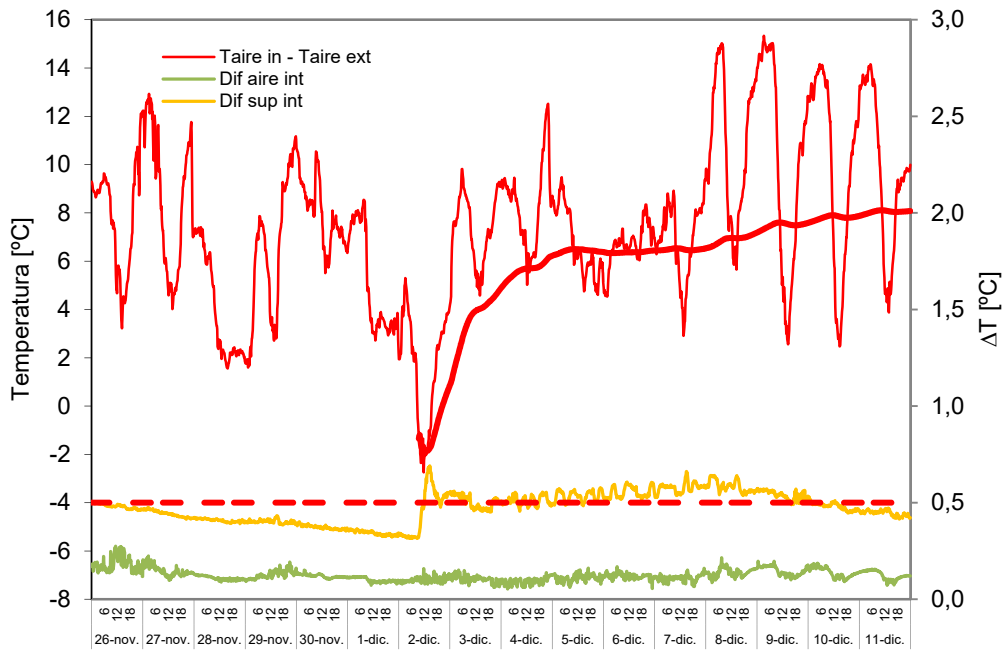


Figura C.50– Salto de temperaturas entre ambientes y homogeneidad de las condiciones en la sala de ensayo para la fachada ventilada forzada

En la Figura C.51 se muestran las temperaturas medias en cada capa de la probeta de fachada forzada, y la homogeneidad en la superficie interior.

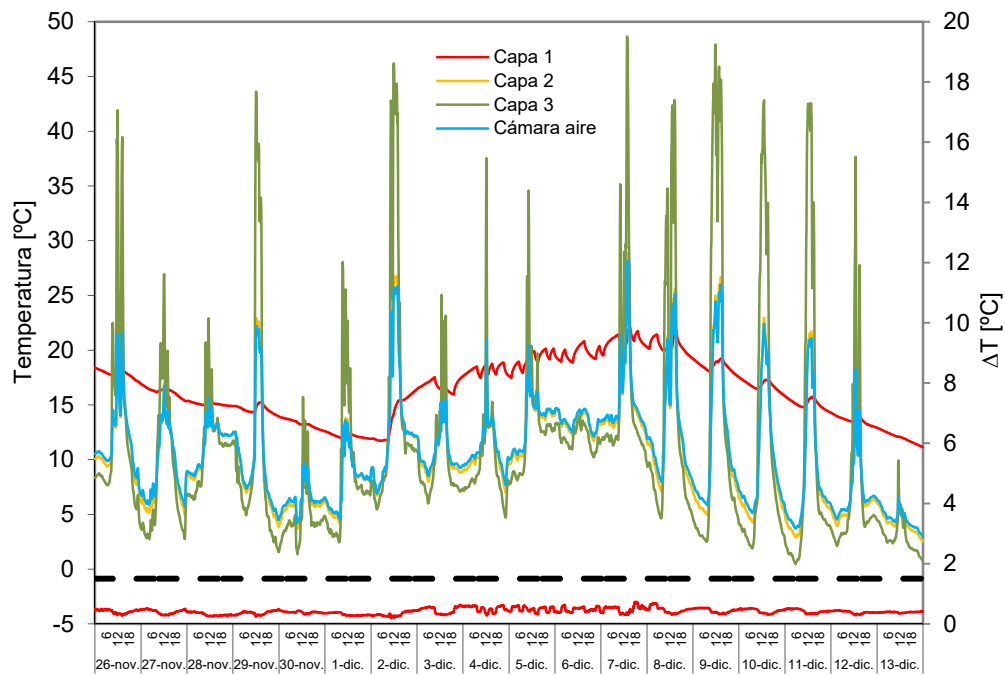


Figura C.51 – Temperaturas en la probeta de fachada ventilada forzada

En la Figura C.52 se muestran la evolución de la temperatura del aire de la cámara ventilada en función de la altura, junto con las temperaturas de las superficies que la conforman.

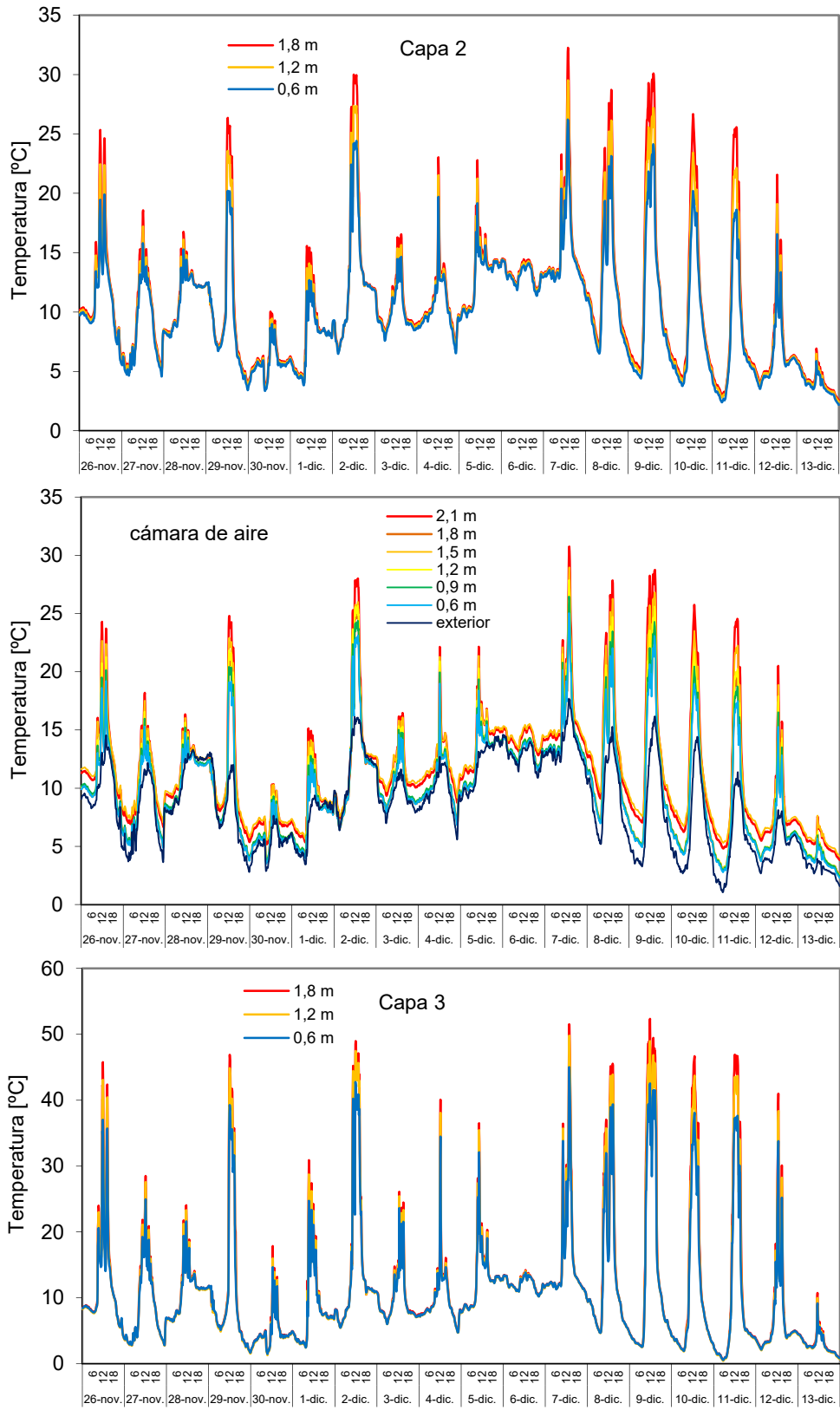


Figura C.52–Temperatura en función de la altura en el eje central de la cámara ventilada en la probeta de fachada forzada

En la Figura C.53 se muestra la comparativa entre la diferencia de temperaturas entrada-salida del aire en la cámara ventilada medida por la termopila y por las sondas de temperatura puntuales.

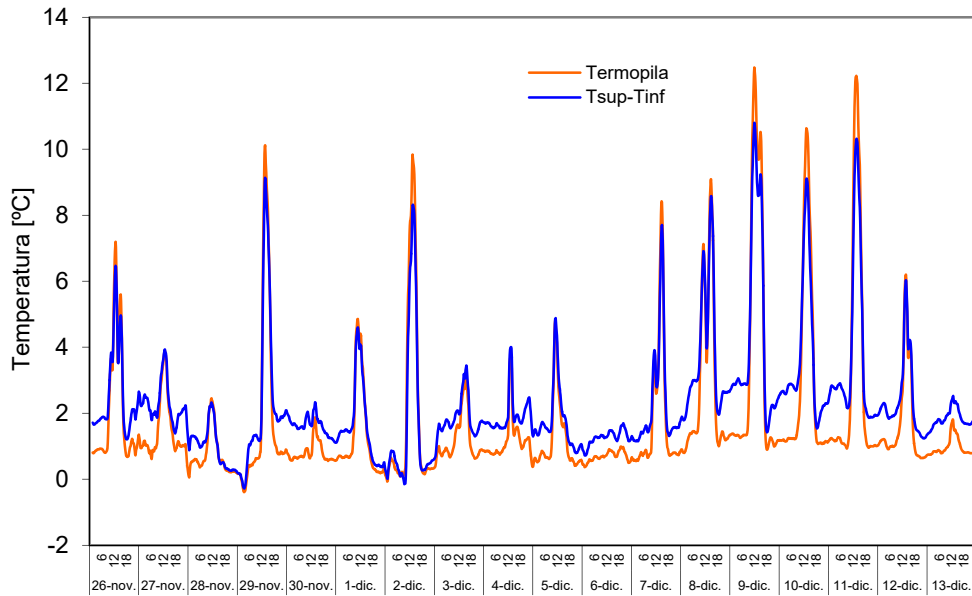


Figura C.53 – Salto de temperatura en la cámara de aire ventilada medido por la termopila y por las sondas instaladas en el eje central de la muestra

En la Figura C.54 se muestra la comparativa entre el caudal de aire medido en la tolva de extracción frente a la velocidad de aire puntual medida por el termoanemómetro situado en el punto central de la cámara de aire a media altura de la probeta.

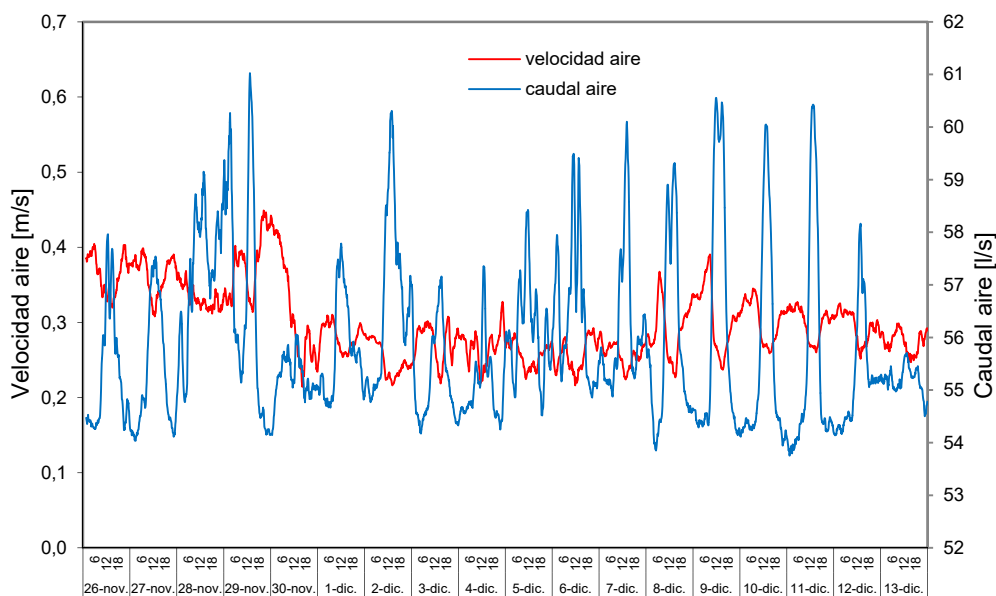


Figura C.54 – Caudal de aire circulante por la cámara ventilada y velocidad de aire en el punto central de la muestra

En la Figura C.55 se muestran las lecturas de las sondas de diferencia de presión instaladas en la zona de entrada y salida respecto al caudal de aire circulante por la fachada.

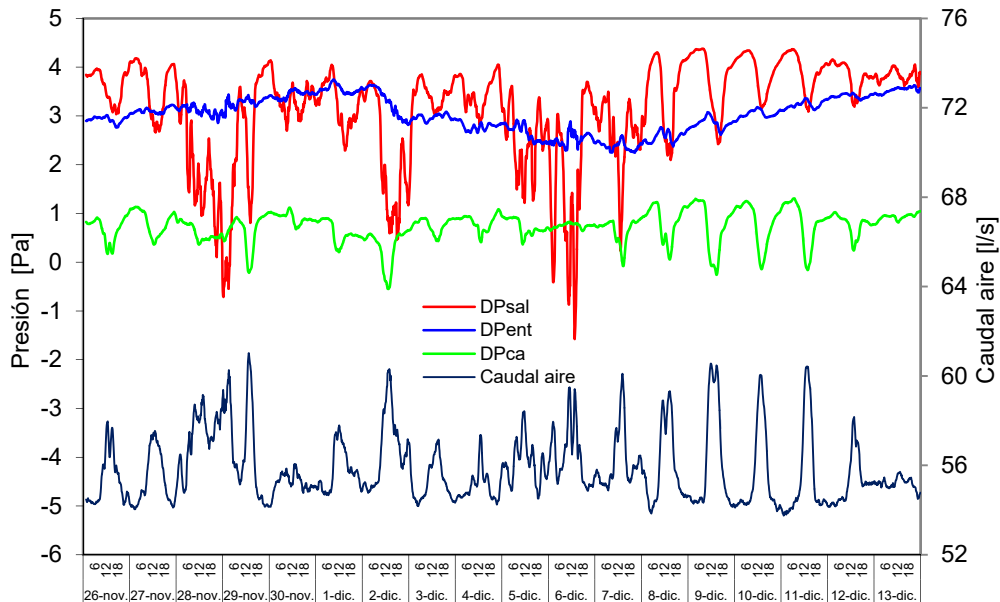


Figura C.55– Caída de presión en la fachada forzada y caudal de aire circulante por la cámara ventilada

C.6 Ensayo de infiltraciones

El análisis de las insiltraciones es un punto importante de cara a la incertidumbre del ensayo. A continuación se muestra en la Tabla C.6 los caudales de infiltraciones obtenidos con salto de presiones de $\Delta P = 50$ [Pa], entre la sala de ensayos y el ambiente exterior. Según los requisitos del ensayo *PASLINK*, el caudal máximo admisible para que las infiltraciones no tengan un efecto representativo en la incertidumbre de ensayo es de $m_a^{max} = 18$ [Nm^3/h], para la celda *EGUZKI*, que equivale a 0,5 [ren/h] de ambiente de la sala de ensayos.

	m_a [Nm^3/h]	
	INICIO	FIN
MURO BASE	10,6	14,2
MURO BASE + SATE	7,8	13,9
FV LIGERA	10,0	16,5
FV PESADA	9,4	15,0
FV FORZADA	14,4	17,5

Tabla C.6 – Medida de infiltraciones en los ensayos de las probetas analizadas

Antes de iniciar el periodo de ensayo se realiza una prueba de presión, midiendo el caudal de infiltraciones aplicando condiciones de sobrepresión y condiciones de subpresión, hasta un salto del orden de 100 [Pa] y decreciendo en intervalos de 10

[Pa]. Los datos experimentales se ajustan a una función potencia que se emplea para determinar el valor fiable de caudal de renovación de referencia. Si el caudal de infiltraciones supera el límite admisible o se acerca al mismo se realiza un sellado de juntas y apriete del sistema de portamuestras hasta alcanzar valores admisibles. Una vez verificado este punto se inicia el periodo de ensayo de la muestra. Una vez finalizado el mismo, antes de acceder a la sala de ensayos se realiza otra prueba de presión para verificar que durante el periodo de ensayo las condiciones no se han modificados sustancialmente y el ensayo se puede dar por válido. En esta segunda prueba de presión es norma obtener caudales más altos debido a que los cordones de sellante se retraen con los ciclos de calor y frio del periodo de ensayo, generando un aumento de las infiltraciones. A continuación, en la Figura C.56 y en la Figura C.57 se muestran los datos exactos de las diferentes pruebas de presión realizadas a cada ensayo.

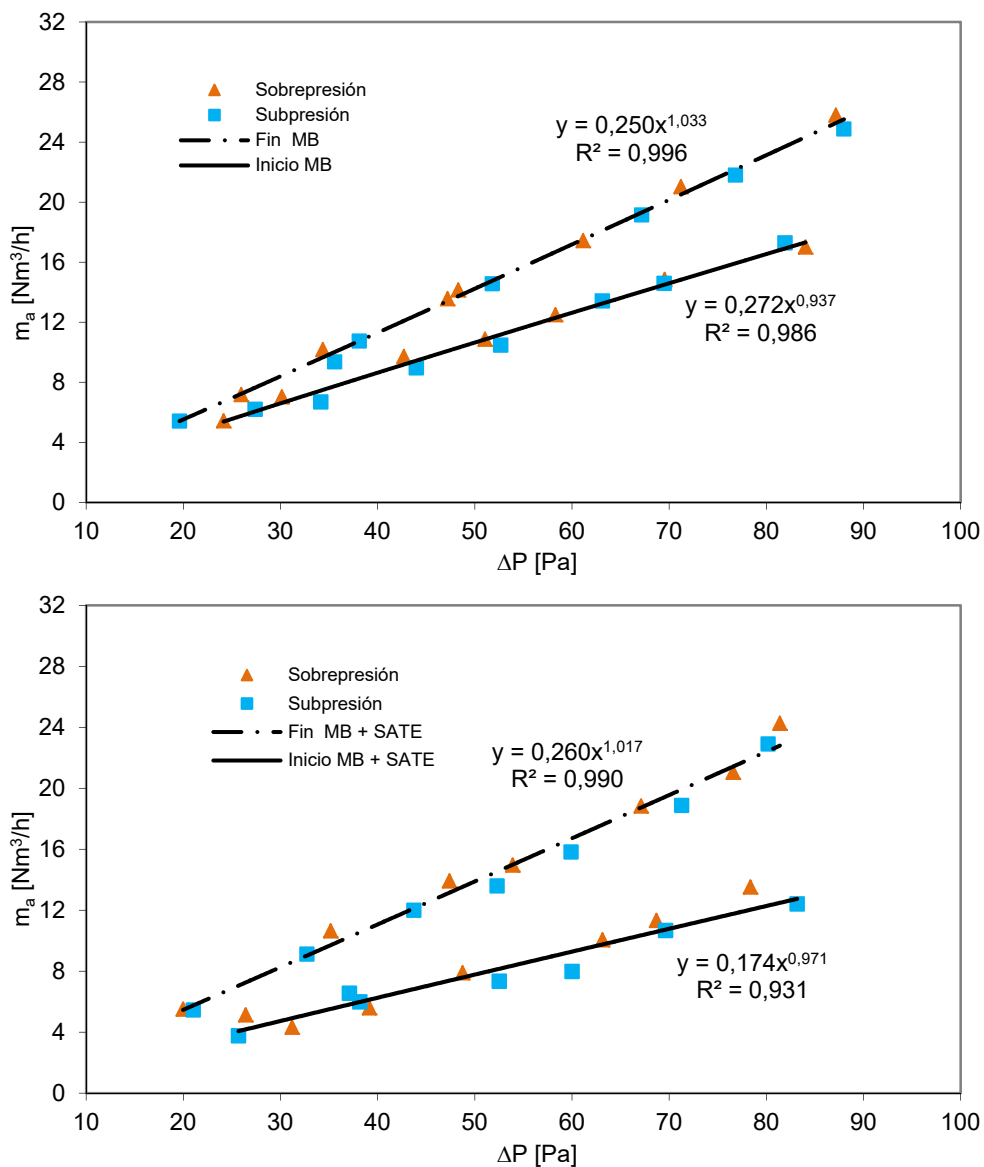


Figura C.56- Prueba de infiltraciones realizada a cada probeta al inicio y fin del ensayo

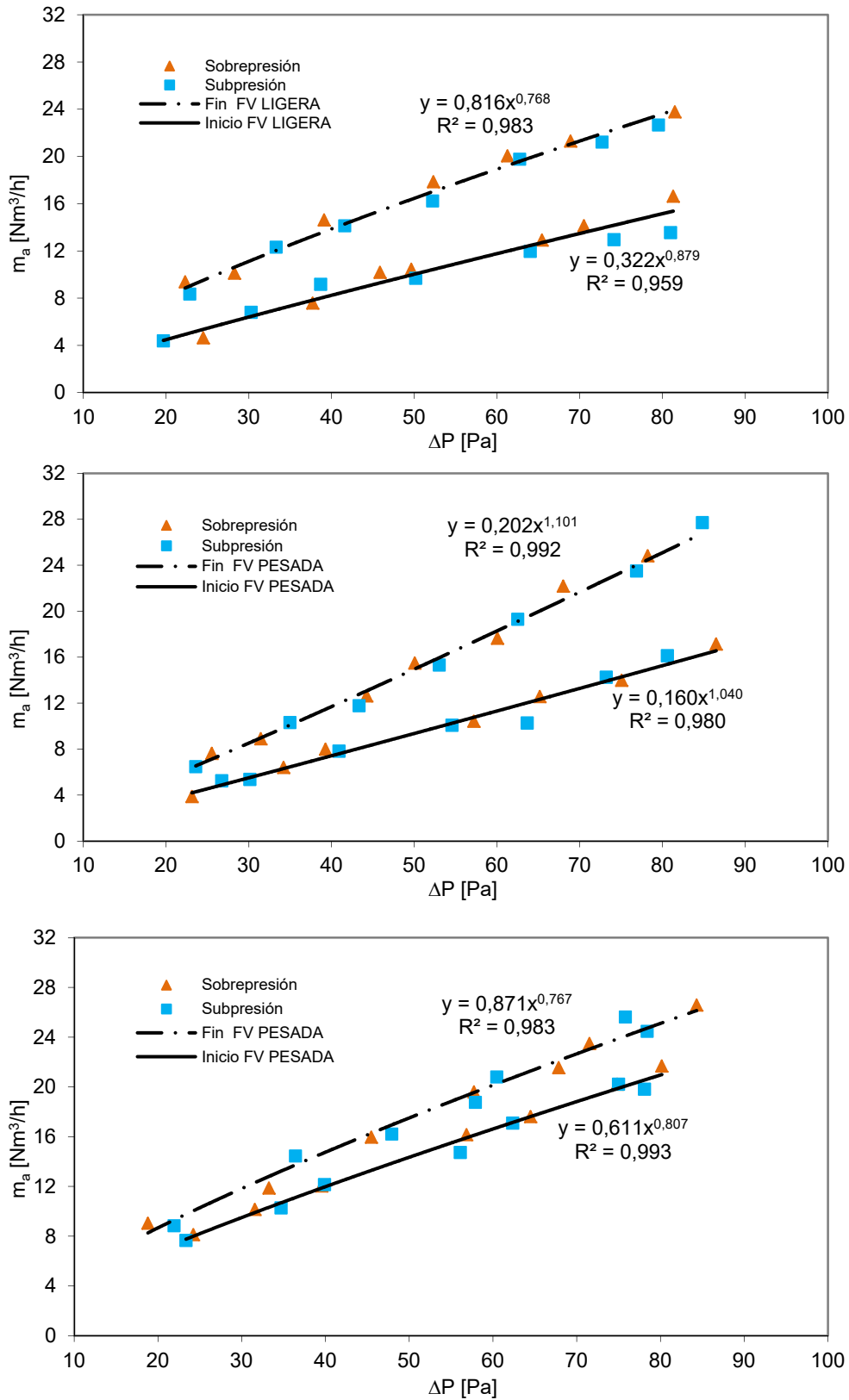
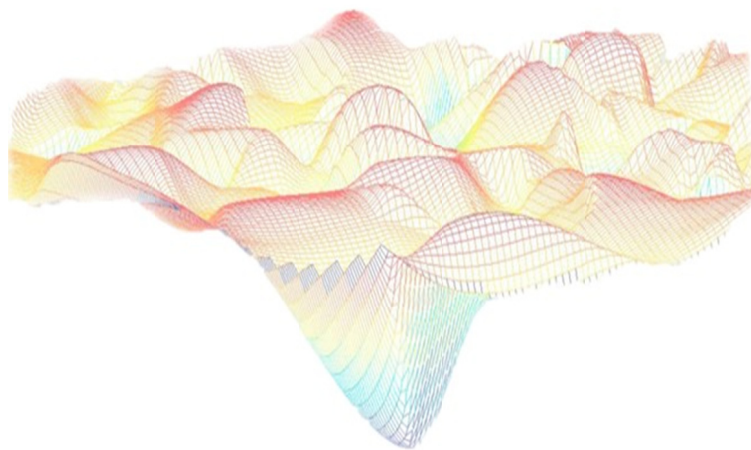


Figura C.57– Prueba de infiltraciones realizada a cada probeta al inicio y fin del ensayo

Anexo D

Modelos matemáticos de las fachadas





D.1 Modelo de muro base sin aislamiento

El ensayo del muro base tiene un carácter fundamental, no tanto por la complejidad de la probeta sino por ser el primer ensayo de una muestra eterogénea frente a las características homogéneas del muro de calibración y de los componentes del IQ-Test. Este ensayo permite obtener un primer resultado de incertidumbre aplicado a muestras de fachada real. Además, por tratarse de la solución constructiva que sirve como base para dos de las fachadas ventiladas bajo estudio, su adecuada caracterización es fundamental para obtener precisión en el análisis de flujos intercambiados en las superficies de las cámaras ventiladas. Por esta razón, el proceso de análisis se configura de forma similar al empleado en el ensayo IQ-Test, primero se analiza el flujo unidimensional mediante las sondas de temperatura y fluxímetros puntuales instalados en la zona central de la muestra y después se analiza la probeta completa con un modelo a escala de celda. A continuación se muestran los resultados de dichos modelos.

D.1.1 Modelo unidimensional

En la Figura D.1 se muestra el modelo del muro base para el análisis de condiciones de flujo unidimensional. El modelo es de cuarto orden y se representan las diferentes capas que lo conforman. El tabique interior se modela entre los nodos T_1 y T_2 , la cámara de aire entre los nodos T_2 y T_3 , y la hoja exterior mediante los nodos T_3 y T_4 .

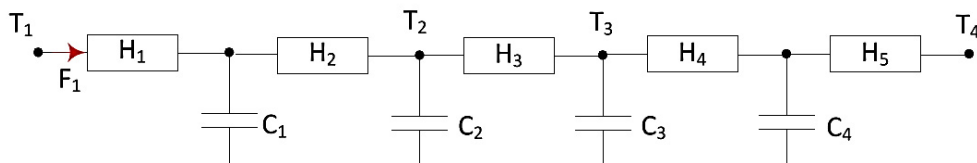


Figura D.1 – Modelo flujo unidimensional del muro base sin aislamiento

Las ecuaciones [D.1] y [D.2] recogen las características del modelo y la definición de las funciones objetivo, que corresponden con las temperaturas de las capas interiores de la muestra, T_2 y T_3 , y el flujo en la superficie interior, F_1 .

$$\begin{bmatrix} dT_{12} \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_2}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_5}{C_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_4 \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt \quad [D.1]$$

$$\begin{bmatrix} T_2^m \\ T_3^m \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -H_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ H_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_4 \end{bmatrix} + [e] \quad [D.2]$$

En la Tabla D.1 y en la Tabla D.2 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.3 y Figura D.4.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0,1	10	1000	8.38E+00	3.43E-01	27,692	0	0,0040
H ₂	0,1	10	1000	1.79E+01	1.06E-01	96,157	0,0047	0
C ₁	1	100	1500	5.49E+01	8.22E-01	73,235	0,0031	0,0044
C ₂	1	100	1500	2.68E+01	6.23E-01	96,970	-0,0016	-0,0045
H ₃	0,1	10	1000	5.34E+00	9.28E-02	92,449	0	0
C ₃	1	100	1500	2.28E+02	3.02E+01	13,231	-0,0042	0
H ₄	0,1	10	1000	1.15E+01	3.63E+00	3,626	0	0,0022
C ₄	1	100	1500	3.36E+01	6.22E+00	66,426	0,0042	-0,0018
H ₅	0,1	10	1000	1.54E+01	1.70E+00	97,062	0,0043	0,0044

Tabla D.1 – Resultados identificación parámetros para el modelo unidimensional del muro base

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅
H ₁	1								
H ₂	0,27	1							
C ₁	0,06	0,20	1						
C ₂	0,47	0,33	0,44	1					
H ₃	0,23	0,47	0,30	0,17	1				
C ₃	0,08	0,47	0,01	0,07	0,12	1			
H ₄	0,07	0,12	0,01	0,14	0,29	0,41	1		
C ₄	0,02	0,25	0,34	0,15	0,32	0,22	0,44	1	
H ₅	0,44	0,09	0,37	0,19	0,25	0,46	0,00	0,07	1

Tabla D.2 – Coeficientes de correlación parámetros modelo unidimensional del muro base

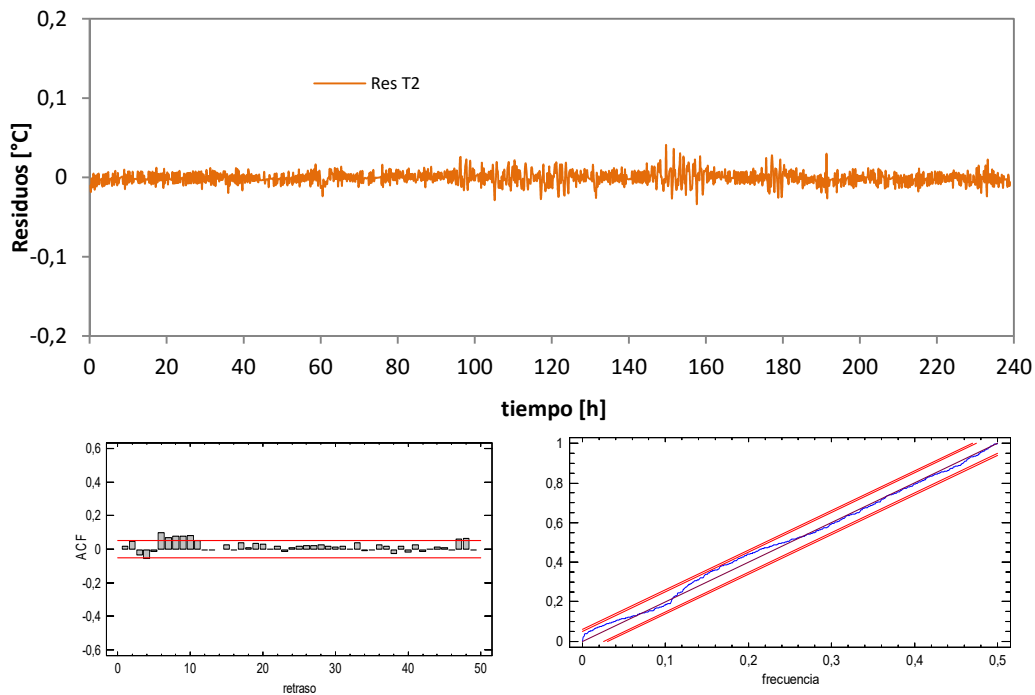


Figura D.2 – Ajuste del modelo unidimensional del muro base

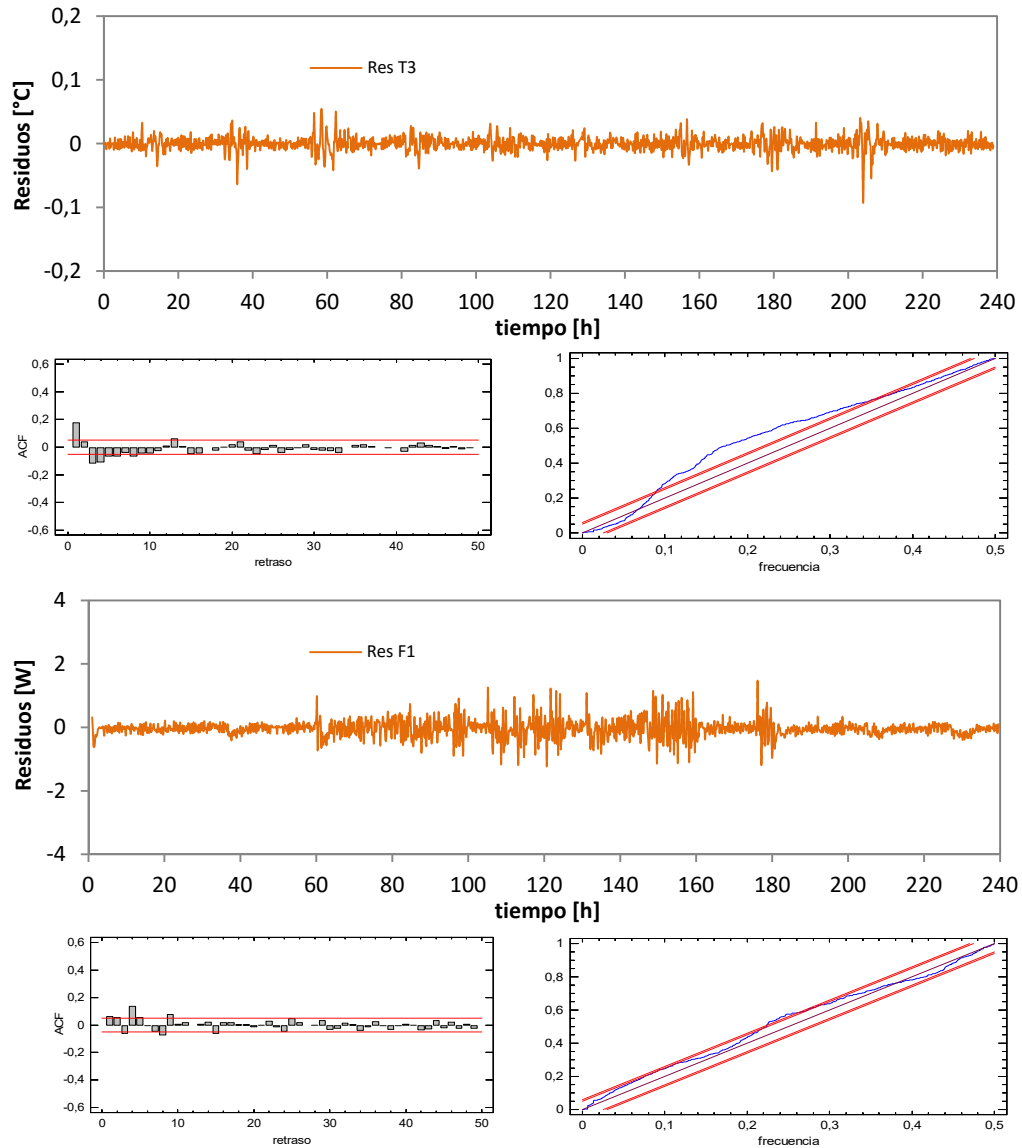


Figura D.3 – Ajuste del modelo unidimensional del muro base

En la Tabla D.3 se muestran los resultados finales de las propiedades térmicas del muro base obtenidas a través de los resultados del modelo de identificación.

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0,175	2,9	C _{tab}	0,049	1,8
R _{ca}	0,187	1,7	C _{perf}	0,157	13,9
R _{perf}	0,152	18,0	C_{total}	0,207	11,0
R_{total}	0,514	6,9			

Tabla D.3 – Propiedades de cada capa del modelo unidimensional de muro base

D.1.2 Modelo completo

En la Figura D.4 se muestra el modelo completo a escala de celda, en el que se tiene en cuenta la radiación solar incidente sobre la superficie exterior. En la ecuación [D.3] y en la ecuación [D.4] se muestra su expresión matricial.

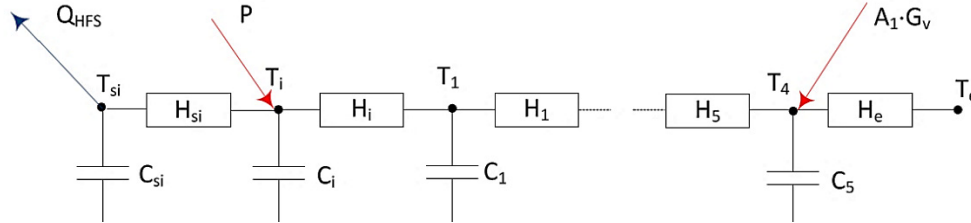


Figura D.4 – Modelo flujo completo del muro base sin aislamiento

$$\begin{bmatrix} dT_{si} \\ dT_i \\ dT_1 \\ dT_{12} \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_{34} \\ dT_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-H_{si}}{C_{si}} & \frac{H_{si}}{C_{si}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_{si}}{C_i} & \frac{-(H_{si} + H_i)}{C_i} & \frac{H_i}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_i}{C_1} & \frac{-(H_i + H_1)}{C_1} & \frac{H_1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-(H_1 + H_2)}{C_{12}} & \frac{H_2}{C_{12}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_4}{C_4} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_4} & \frac{H_5}{C_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_5} & \frac{-(H_5 + H_e)}{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{si} \\ T_i \\ T_1 \\ T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \\ T_4 \end{bmatrix} dt \quad [D.3]$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{si}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_e}{C_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{A_1}{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} dt + [\sigma] dt$$

$$\begin{bmatrix} T_{si}^m \\ T_i^m \\ T_1^m \\ T_2^m \\ T_3^m \\ T_4^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{si} \\ T_i \\ T_1 \\ T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \\ T_4 \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} + [e] \quad [D.4]$$

En la Tabla D.3 y en la Tabla D.4 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.6 y Figura D.7.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H _{si}	100	250	500	3.41E+02	9.89E+00	70.207	-0.0005	-0.0039
C _{si}	100	1000	2000	9.79E+02	4.72E+01	69.372	-0.0042	-0.0032
C _i	1	50	100	5.89E+01	6.19E+00	12.952	-0.0044	0.0013
H _i	1	50	100	6.27E+01	1.06E+00	54.845	-0.0002	-0.0042
C ₁	10	500	1000	2.14E+02	1.13E+01	6.942	0.0038	-0.0044
H ₁	1	10	100	7.44E+01	3.55E+00	70.089	0.0026	-0.0007
H ₂	1	10	100	1.02E+02	4.13E+00	81.745	-0.0038	0.0014
C ₁₂	10	500	1000	1.49E+02	1.95E+01	31.286	0.0038	0.0010
C ₂	10	500	1000	1.82E+02	3.79E+00	75.355	-0.0030	0.0027
H ₃	10	50	100	3.90E+01	1.11E+00	70.111	0.0044	-0.0004
C ₃	100	1000	2000	9.69E+01	2.31E+00	9.414	-0.0039	0.0008
H ₄	10	100	500	1.54E+02	7.52E-01	29.116	0.0031	0.0045
C ₄	100	1000	2000	3.45E+02	1.56E+01	27.421	0.0040	-0.0042
H ₅	10	100	500	7.42E+01	9.06E-01	33.667	0.0031	-0.0011
C ₅	100	1000	2000	9.05E+01	4.10E+00	10.393	-0.0011	0.0015
H _e	10	200	500	1.71E+02	2.02E+01	63.901	-0.0046	0.0008
A ₁	1	4	7	5.81E+00	6.78E-01	21.375	0.0013	-0.0015

Tabla D.3 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo del muro base

	H _{si}	C _{si}	C _i	H _i	C ₁	H ₁	H ₂	C ₁₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₄	H ₅	C ₅	H _e	A ₁
H _{si}	1																
C _{si}	0.22	1															
C _i	0.29	0.01	1														
H _i	0.48	0.02	0.60	1													
C ₁	0.15	0.49	0.21	0.27	1												
H ₁	0.58	0.54	0.61	0.05	0.19	1											
H ₂	0.52	0.28	0.21	0.18	0.12	0.29	1										
C ₁₂	0.66	0.60	0.09	0.67	0.50	0.48	0.47	1									
C ₂	0.31	0.28	0.37	0.15	0.37	0.17	0.32	0.38	1								
H ₃	0.36	0.55	0.24	0.28	0.34	0.66	0.45	0.31	0.08	1							
C ₃	0.08	0.26	0.29	0.15	0.13	0.05	0.00	0.57	0.13	0.31	1						
H ₄	0.49	0.11	0.63	0.11	0.31	0.59	0.12	0.48	0.63	0.50	0.02	1					
C ₄	0.36	0.59	0.29	0.41	0.65	0.43	0.20	0.64	0.12	0.25	0.07	0.43	1				
H ₅	0.15	0.48	0.29	0.55	0.07	0.34	0.24	0.00	0.52	0.65	0.04	0.28	0.36	1			
C ₅	0.48	0.59	0.56	0.46	0.23	0.30	0.03	0.15	0.16	0.19	0.45	0.52	0.08	0.28	1		
H _e	0.53	0.58	0.47	0.57	0.33	0.51	0.49	0.56	0.24	0.40	0.59	0.39	0.29	0.07	0.14	1	
A ₁	0.33	0.29	0.23	0.44	0.27	0.23	0.37	0.18	0.34	0.07	0.45	0.33	0.20	0.08	0.66	0.03	1

Tabla D.4 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo del muro base

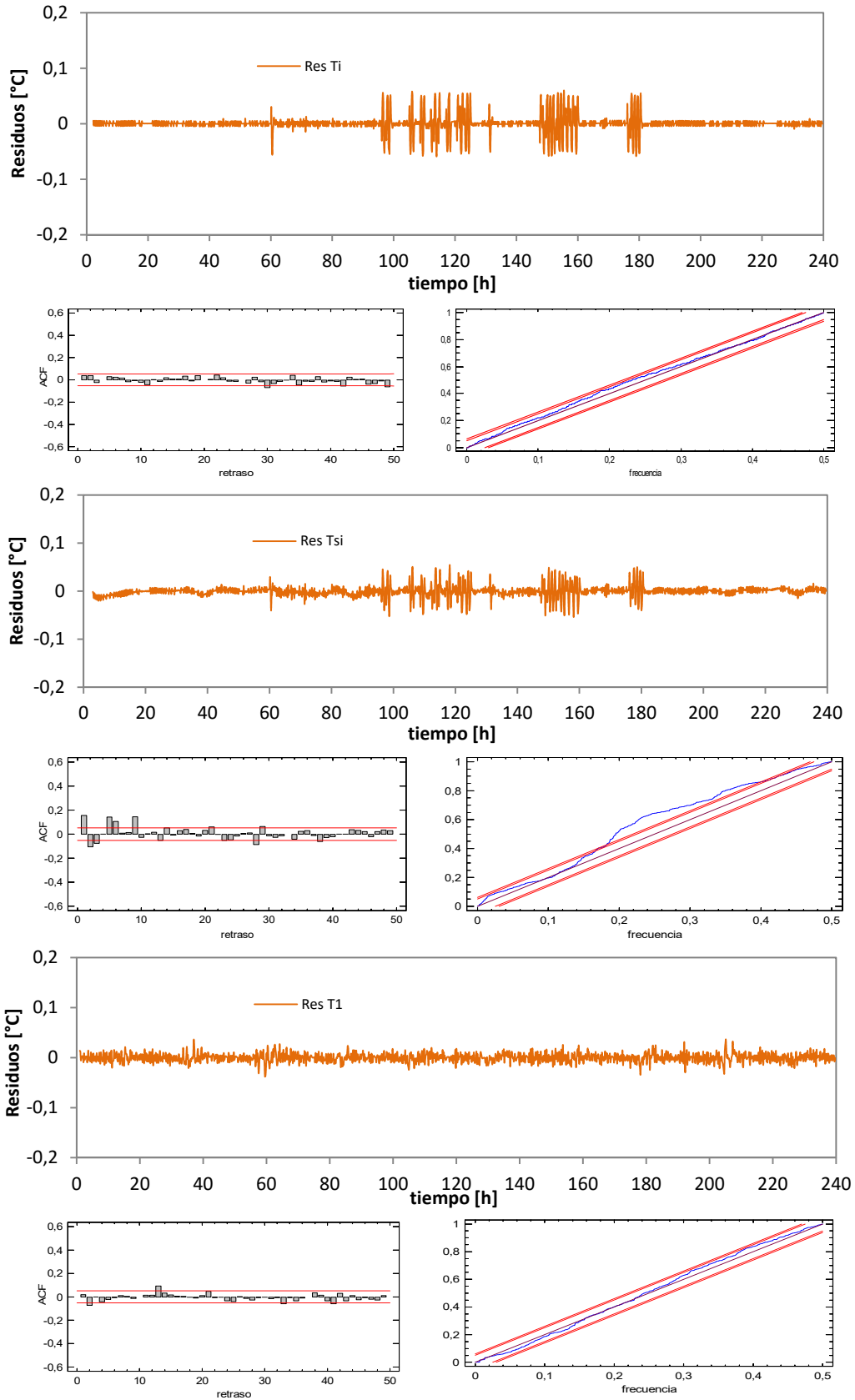


Figura D.6 – Ajuste del modelo completo del muro base

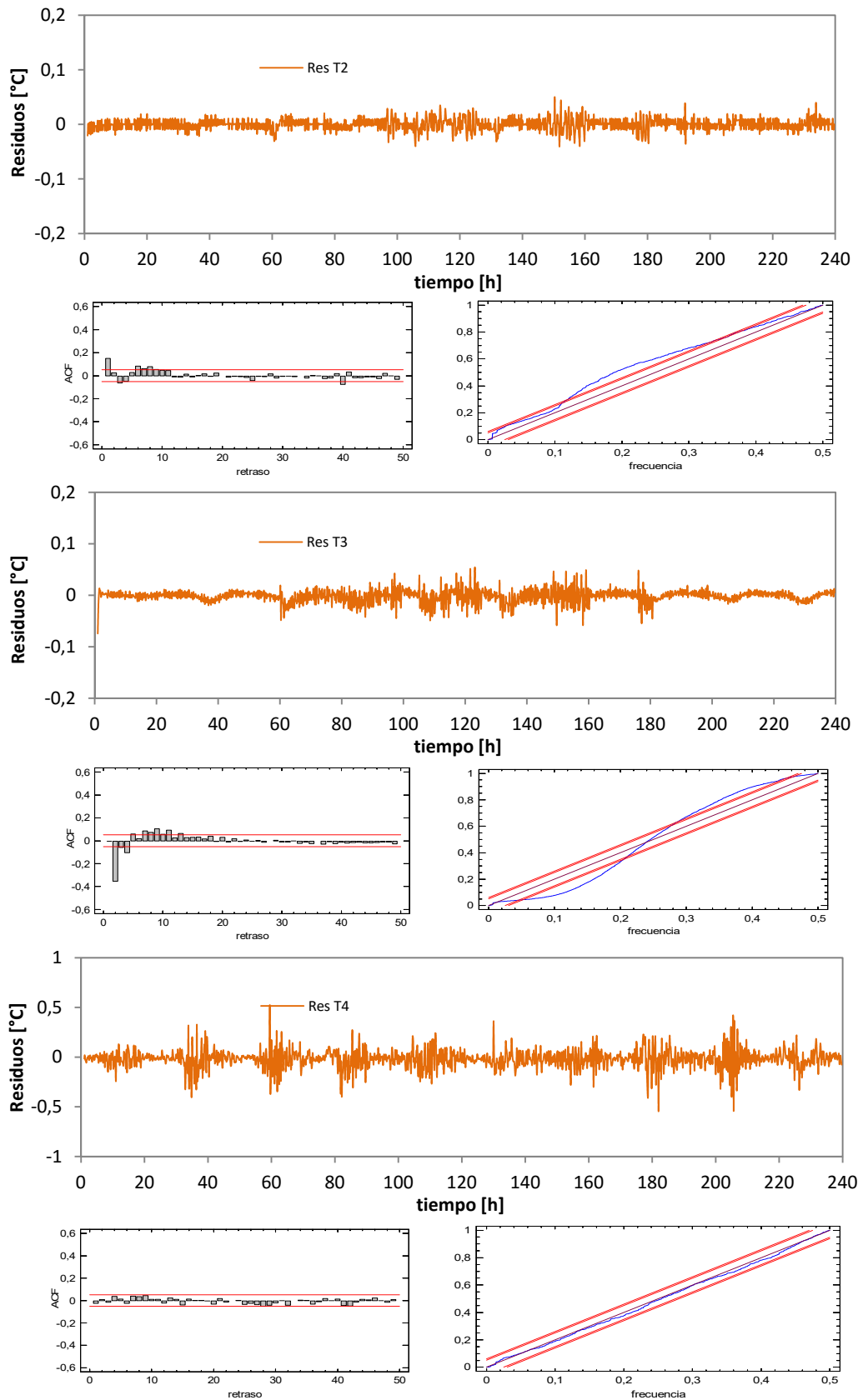


Figura D.7 – Ajuste del modelo completo del muro base

Una vez validados los resultados del modelo de identificación en la Tabla D.5 se muestran los resultados finales para las propiedades térmicas correspondientes a cada capa del muro base, junto con la incertidumbre final del ensayo.

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0,168	4,3	C _{tab}	0,045	6,3
R _{ca}	0,185	2,8	C _{perf}	0,162	3,9
R _{perf}	0,144	1,0	C_{total}	0,208	4,4
R_{total}	0,496	2,8			

Tabla D.5 –Propiedades del modelo de celda completo para el muro base

D.2 Modelo de muro base con aislamiento

En todo proceso de estudio experimental es necesario complementar los resultados de las medidas y ensayos con la incertidumbre que acompaña a los mismos, para así, poder tomar decisiones de su validez y del rango de aplicación. Entendiendo el concepto de incertidumbre como una cuantificación de la calidad del resultado indicado, y como una herramienta fundamental para la declaración de conformidad con respecto a unas especificaciones o procedimientos. El proceso de medida se estudia de forma que se identifique el máximo número de causas de error, controlando sus valores por debajo de un límite admisible, y trasladando su efecto en la expresión de la incertidumbre del resultado. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el diagrama causa-efecto en el procedimiento *PASLINK*. En dicho diagrama se recogen el conjunto de fuentes que participan de la incertidumbre del ensayo.

D.2.1 Modelo unidimensional

Siguiendo la misma metodología para el muro base con aislamiento, primero se determina el comportamiento unidimensional mediante las sondas de temperatura y flujo situadas en la zona central de la muestra y posteriormente se analiza el componente completo. En la Figura D.8 se muestra el modelo ampliado para representar la capa de aislamiento. Aunque la capa de aislamiento no tiene una capacidad térmica representativa, de cara al ajuste del modelo durante el proceso de identificación de parámetros es más correcto representarla mediante dos conductancias y una capacidad. Las que ecuaciones que representan dicho modelo se muestran en [D.5] y en [D.6].

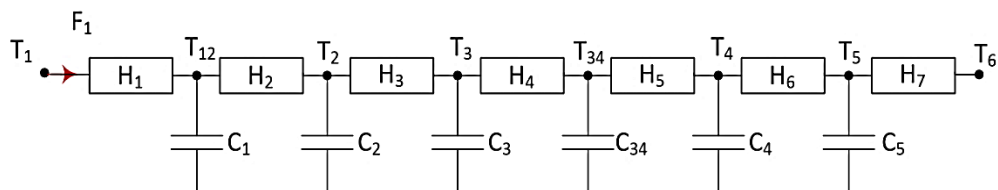


Figura D.8 – Modelo flujo unidimensional del muro base con aislamiento

$$\begin{bmatrix} dT_{12} \\ dT_2 \\ dT_3 \\ dT_4 \\ dT_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(H_1 + H_2)}{C_1} & \frac{H_{12}}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_2}{C_2} & \frac{-(H_2 + H_3)}{C_2} & \frac{H_3}{C_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_3} & \frac{-(H_3 + H_4)}{C_3} & \frac{H_4}{C_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_4}{C_{34}} & \frac{-(H_4 + H_5)}{C_{34}} & \frac{H_5}{C_{34}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_5}{C_4} & \frac{-(H_5 + H_6)}{C_4} & \frac{H_6}{C_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_6}{C_5} & \frac{-(H_6 + H_7)}{C_5} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_7}{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_6 \end{bmatrix} dt + [\sigma]dt \quad [D.5]$$

$$\begin{bmatrix} T_2^m \\ T_3^m \\ T_4^m \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -H_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{34} \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_6 \end{bmatrix} + [e] \quad [D.6]$$

En la Tabla D.6 y en la Tabla D.7 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.9 y Figura D.10.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
H ₁	0.1	10	1000	1.71E+01	4.93E-01	33.638	-0.0049	0
H ₂	0.1	10	1000	8.53E+00	2.96E-01	6.436	0	-0.0037
C ₁	1	100	1500	2.39E+01	7.67E+00	38.158	-0.0033	0
C ₂	1	100	1500	5.74E+01	2.18E+00	54.400	0.0021	-0.0041
H ₃	0.1	10	1000	5.43E+00	2.90E-01	57.259	-0.0049	0.0019
C ₃	1	100	1500	8.50E+01	4.63E+00	94.190	0	0
H ₄	0.1	10	1000	1.10E+01	5.46E-01	51.812	0.0029	-0.0043
C ₃₄	1	100	1500	1.07E+02	1.48E+01	78.168	-0.0011	0
H ₅	0.1	10	1000	1.56E+01	2.00E-01	54.377	0.0017	-0.0047
C ₄	1	100	1500	6.90E+01	1.86E+00	69.459	-0.0021	0.0016
H ₆	0.1	10	1000	3.07E+00	1.87E-01	18.399	0.0027	-0.0015
C ₅	1	100	1500	1.47E+01	4.47E+00	2.945	0.0046	-0.0042
H ₇	0.1	10	1000	9.76E-01	5.14E-02	10.321	0	0

Tabla D.6 – Resultados identificación parámetros para el modelo unidimensional del muro base con aislamiento

	H ₁	H ₂	C ₁	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C ₃₄	H ₅	C ₄	H ₆	C ₅	H ₇
H ₁	1												
H ₂	-0.20	1											
C ₁	0.06	-0.46	1										
C ₂	0.09	-0.29	0.43	1									
H ₃	-0.45	0.03	-0.12	0.25	1								
C ₃	-0.11	0.21	0.21	0.26	0.23	1							
H ₄	-0.05	-0.06	0.31	-0.22	0.22	0.02	1						
C ₃₄	-0.36	0.14	-0.12	0.14	0.45	0.32	-0.48	1					
H ₅	0.26	-0.16	0.43	0.29	-0.29	0.01	0.36	0.08	1				
C ₄	-0.04	-0.24	-0.23	-0.15	0.11	0.38	0.11	0.01	0.15	1			
H ₆	-0.21	0.09	-0.37	-0.45	0.36	0.42	0.26	0.36	-0.16	-0.22	1		
C ₅	-0.36	-0.03	0.21	-0.42	0.09	0.17	0.49	0.17	0.44	-0.27	-0.49	1	
H ₇	0.07	-0.19	0.27	-0.45	0.03	0.25	0.31	-0.02	-0.41	-0.08	-0.39	-0.46	1

Tabla D.7 – Coeficientes de correlación parámetros modelo unidimensional del muro base con aislamiento

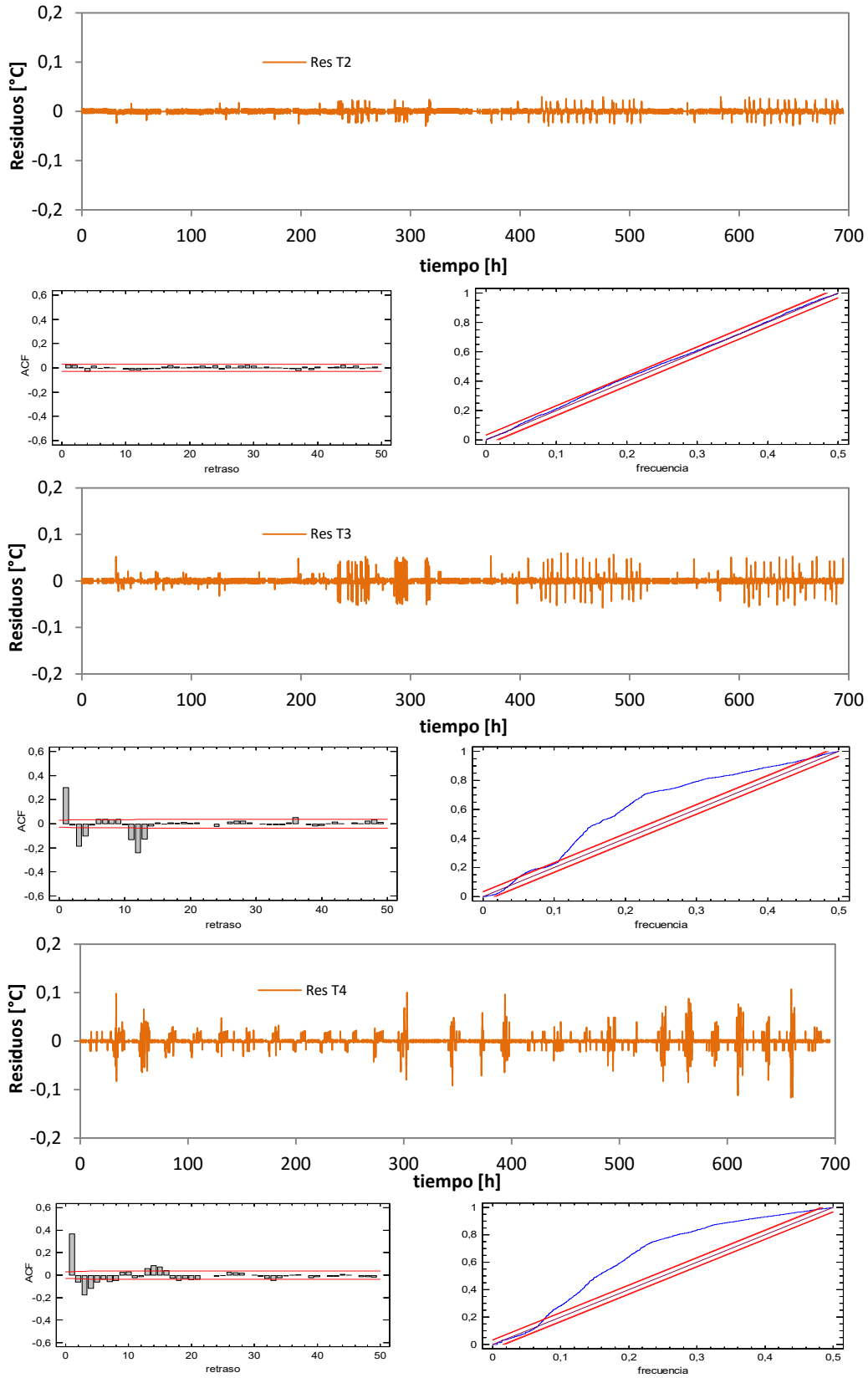


Figura D.9 – Ajuste del modelo unidimensional del muro base con aislamiento

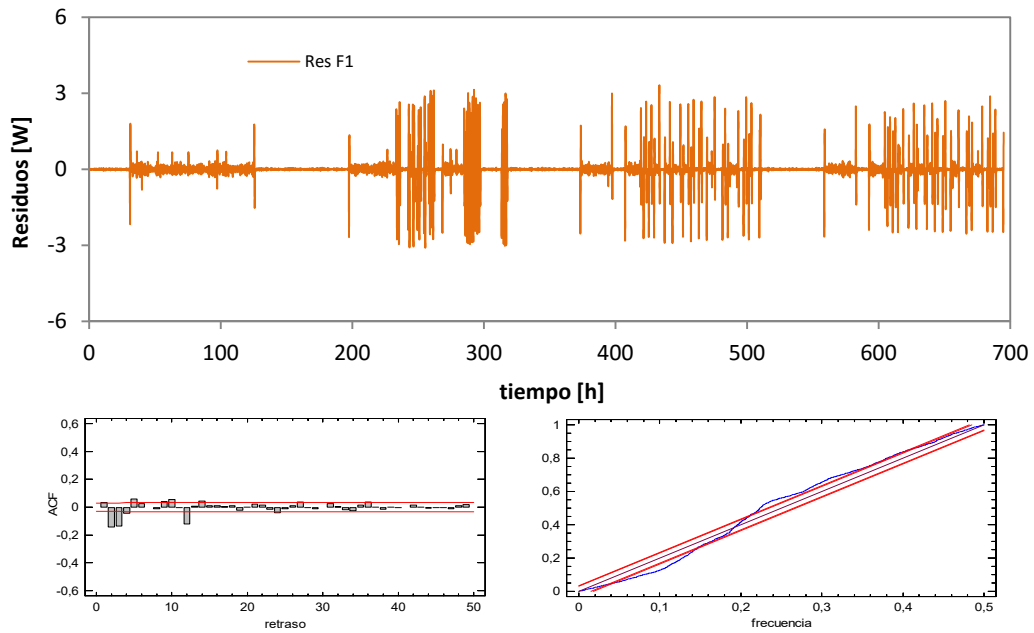


Figura D.10 – Ajuste del modelo unidimensional del muro base con aislamiento

Una vez validado el proceso de identificación de parámetros se obtienen los resultados finales de propiedades térmicas de cada capa de la muestra recogidos en la Tabla D.8.

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0,176	3,2	C _{tab}	0,049	12,1
R _{ca}	0,184	5,1	C _{perf}	0,156	8,2
R _{perf}	0,155	3,3	C _{SATE}	0,009	30,5
R _{SATE}	1,350	5,2	C_{total}	0,214	9,6
R_{total}	1,864	4,8			

Tabla D.8 – Propiedades del modelo unidimensional para el muro base con aislamiento

D.2.2 Modelo completo

Una vez resuelto el modelo unidimensional y verificados los resultados obtenidos se pasa a analizar el modelo a escala de celda, como se muestra en la Figura D.11, cuyas ecuaciones se recogen en [D.7] y [D.8].

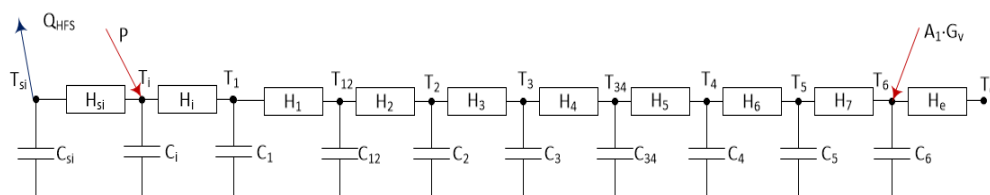


Figura D.11 – Modelo de celda para el muro base con aislamiento exterior

	H_{si}	C_{si}	C_i	H_i	C_1	H_1	H_2	C_{12}	C_2	H_3	C_3	H_4	C_{34}	H_5	C_4	H_6	C_5	H_7	C_6	H_e	A_1	
H_{si}	1																					
C_{si}	-0.3	1																				
C_i	0.1	0.4	1																			
H_i	0.0	-0.3	-0.2	1																		
C_1	0.3	0.1	0.5	0.4	1																	
H_1	0.0	0.1	-0.5	0.0	0.1	1																
H_2	0.2	0.4	-0.3	0.4	-0.3	0.2	1															
C_{12}	-0.1	0.4	0.0	0.3	0.2	0.2	-0.1	1														
C_2	0.2	0.5	-0.3	0.1	0.3	-0.3	0.5	0.0	1													
H_3	0.0	0.0	0.4	0.4	0.4	0.4	-0.1	0.4	0.3	1												
C_3	0.5	0.0	0.3	0.4	-0.1	0.1	0.2	-0.3	-0.1	0.2	1											
H_4	-0.2	0.2	-0.2	-0.4	0.4	0.3	-0.3	0.1	-0.3	0.2	-0.4	1										
C_{34}	0.1	-0.4	-0.1	0.5	0.1	0.3	-0.3	-0.3	0.4	0.0	-0.2	-0.2	1									
H_5	-0.3	0.4	-0.2	0.1	0.0	0.3	0.0	0.2	-0.2	-0.4	0.1	-0.3	-0.1	1								
C_4	0.2	-0.4	-0.3	-0.4	0.2	-0.1	0.2	-0.3	0.4	-0.1	0.4	0.2	0.4	0.1	1							
H_6	-0.3	-0.3	0.2	0.2	0.2	-0.4	-0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.0	-0.3	0.5	0.0	1						
C_5	-0.3	0.0	0.5	0.4	-0.5	0.1	0.3	0.0	-0.2	0.2	0.2	-0.1	-0.5	-0.1	0.5	0.4	1					
H_7	-0.1	0.2	-0.5	0.0	-0.1	0.2	0.1	-0.5	0.3	-0.3	0.3	0.5	-0.1	-0.1	0.4	0.5	-0.3	1				
C_6	0.2	-0.1	-0.1	-0.4	-0.2	-0.2	0.0	-0.5	-0.5	0.3	0.1	-0.3	0.0	0.2	-0.4	0.0	-0.3	-0.1	1			
H_e	0.4	0.3	0.1	0.0	0.3	-0.4	-0.3	0.1	0.4	0.0	0.4	0.4	0.2	-0.4	-0.3	-0.3	0.2	0.1	-0.4	1		
A_1	0.1	0.0	0.4	-0.1	0.0	-0.4	-0.2	0.1	0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.4	0.3	-0.1	0.1	-0.2	-0.2	0.4	1	

Tabla D.10 – Coeficientes de correlación parámetros modelo completo del muro base con aislamiento

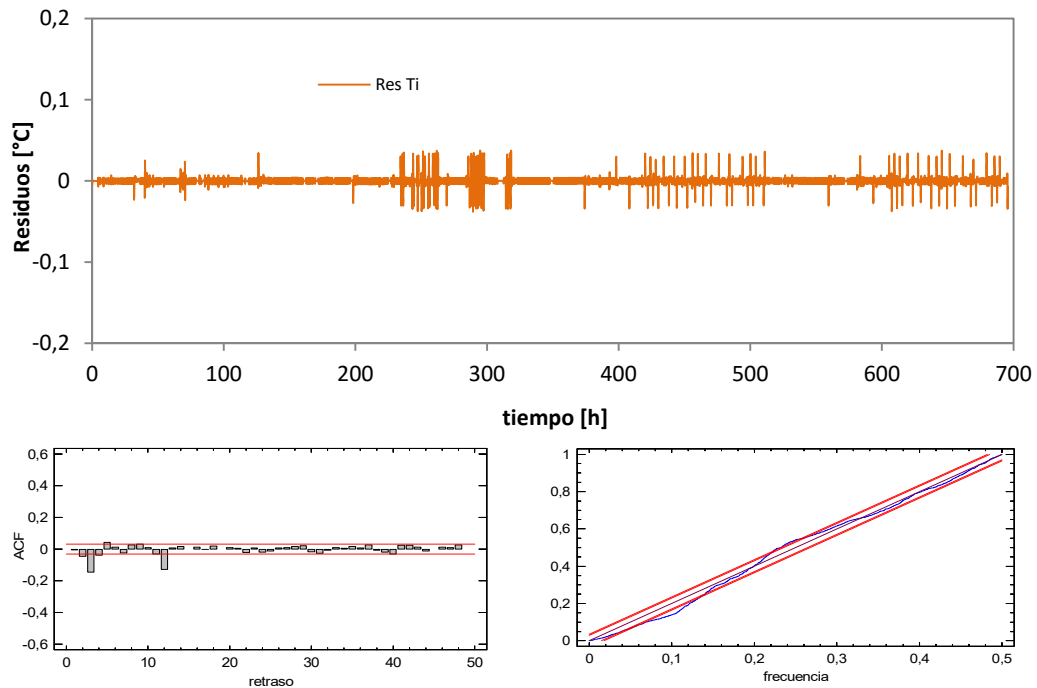


Figura D.12 – Ajuste del modelo completo del muro base con aislamiento

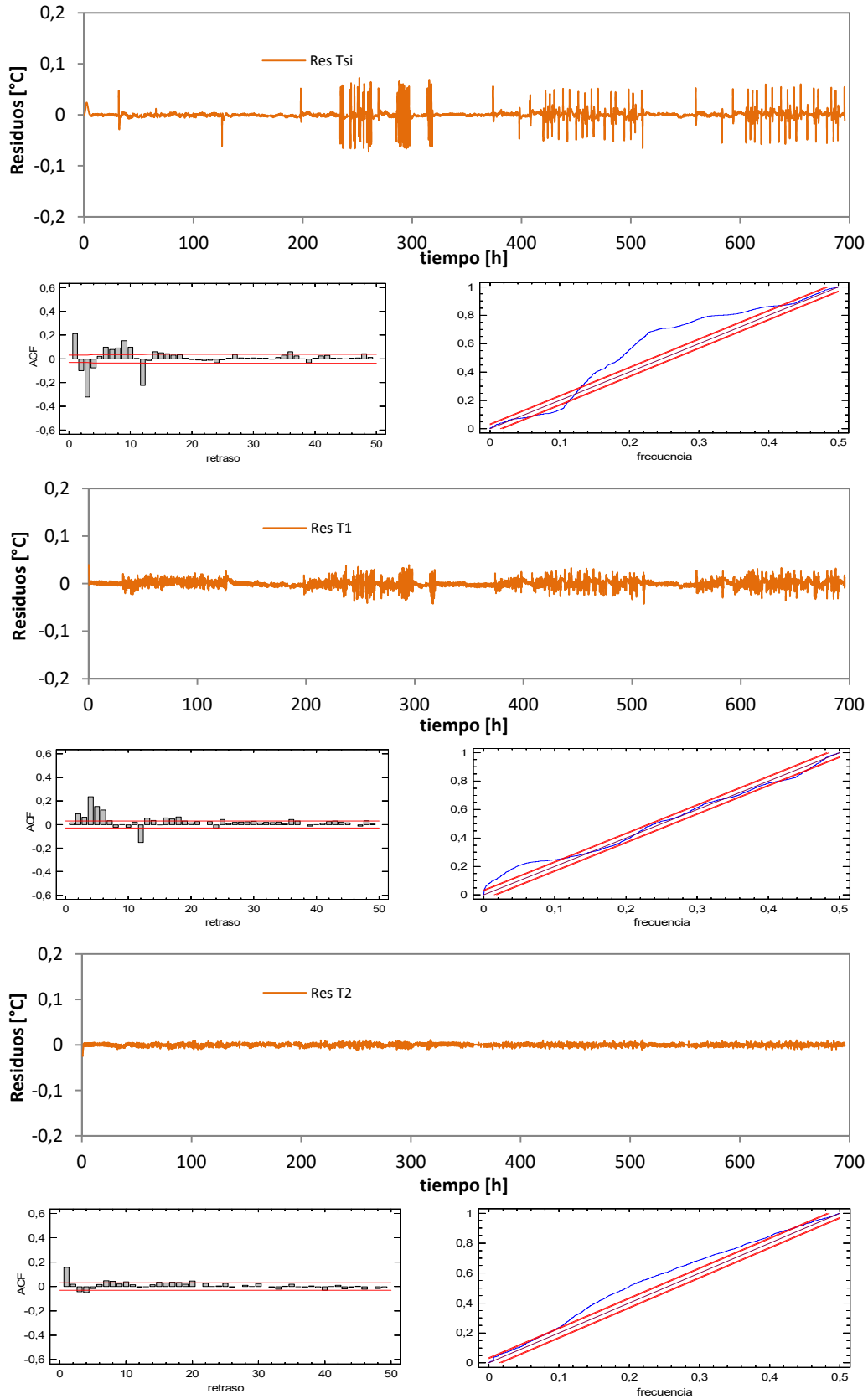


Figura D.13 – Ajuste del modelo completo del muro base con aislamiento

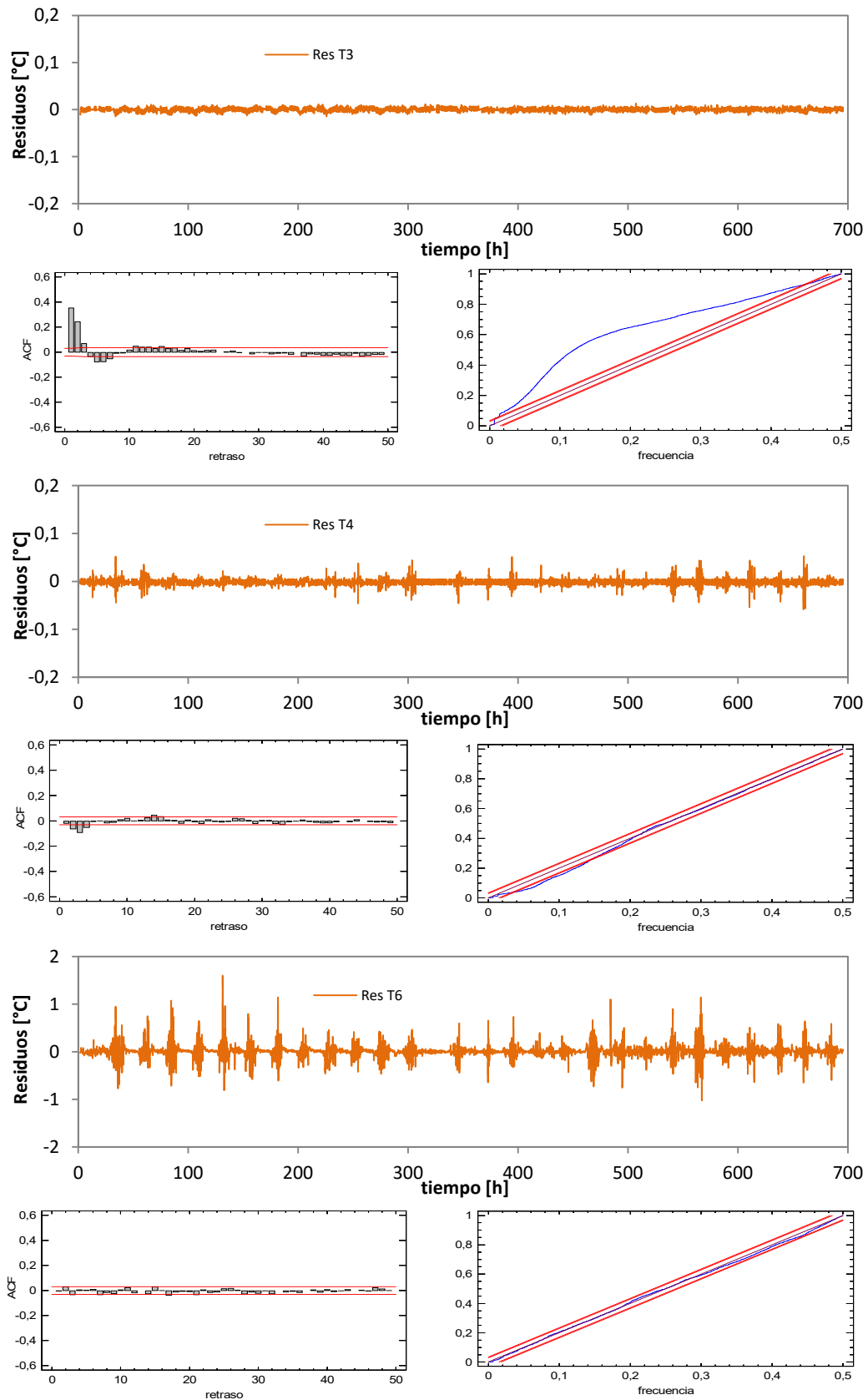


Figura D.14 – Ajuste del modelo completo del muro base con aislamiento

Una vez validado el proceso de identificación de parámetros se obtienen los resultados finales de propiedades térmicas de cada capa de la muestra recogidos en la Tabla D.11.

CAPA	[m ² K/W]	e [%]	CAPA	[MJ/m ² K]	e [%]
R _{tab}	0.177	8.9	C _{tab}	0.049	10.7
R _{ca}	0.183	5.5	C _{perf}	0.160	6.2
R _{perf}	0.159	11.1	C _{SATE}	0.009	15.9
R _{SATE}	1.271	2.0	C_{total}	0.218	7.6
R_{total}	1.790	3.8			

Tabla D.11 – Propiedades térmicas por capa del modelo de celda para el muro base con aislamiento

D.3 Modelo de fachada ventilada

El modelado del comportamiento térmico de la fachada ventilada es el apartado más complejo de la parte experimental. En las probetas de muro base las propiedades térmicas de la muestra permanecen constantes, sin embargo, para la fachada ventilada el proceso de convección varía la respuesta de la probeta en función de las condiciones de temperatura y radiación exteriores. El desarrollo del proceso de modelado de dichas fachadas activas es el hito más representativo de la segunda parte del presente trabajo de investigación. El modelado de la fachada ventilada se divide en dos pasos. El primero consiste en obtener los valores eficientes de las propiedades del flujo de aire en la cámara ventilada para las temperaturas y para las velocidades. Este objetivo se obtiene mediante el empleo de un modelo de volúmenes finitos definido en una herramienta de CFD. Una vez obtenidos los valores eficientes se pasa a definir un modelo en parámetros concentrados que permite reproducir el comportamiento de la fachada para, asu vez, emplearlo en un software de simulación a escala de edificio. A continuación se muestra los cálculos correspondientes a dichas fases de modelado de la probeta de fachada ventilada.

D.3.1 Modelo CFD

En el apartado 5.2.2 de la memoria se define las características del modelo de CFD empleado para el estudio de la cámara de aire ventilada. Se muestran las características del mallado, el cual se a estudiado de forma paramétrica en base al tamaño de celda de forma que se obtienen los mismos resultados con el menor número posible de elementos. Y se emplean zonas de mayor definición para las cápas límite. También se definen los modelos de flotación, turbulencia, etc..., empleados. Pero aunque el modelo converja y se optimice en sus propiedades siempre es necesario validar los resultados con los datos experimentales. Este paso final es complejo de conseguir, ya que en la mayoría de casos no se disponen de dichos datos a

escala de probeta real como es el caso del ensayo *PASLINK*. Este es un aspecto a favor de la metodología de ensayo empleada frente a otros estudios sobre el comportamiento energético de fachadas ventiladas. El paso de validación es un paso complejo y costoso, ya que los primeros resultados se suelen alejar de los datos experimentales, lo que implica un proceso iterativo de ajuste, que debido al coste computacional de los modelos de *CFD* se alarga en el tiempo, exigiendo muchas horas de tratamiento de datos. Por ejemplo, el modelo estudiado tarda del orden de un día en resolver de forma dinámica el intervalo de tiempo empleado de 5 días.

Una vez obtenidos los resultados es necesario postprocesar los datos y compararlos con los valores equivalentes medidos en el ensayo. En función de las divergencias se ajustan las propiedades del modelo, y se repite el proceso hasta obtener resultados válidos. En el siguiente apartado se muestran los resultados de ajuste finales obtenidos para el modelo de *CFD*.

D.3.1.1 Ajuste del modelo con datos experimentales

En la Figura D.15 y Figura D.16 se muestra la comparativa entre los resultados del modelo respecto a los valores medidos para las velocidades en la cámara de aire ventilada. La validación de un modelo cuando existe un número de puntos y variables de contraste elevado es compleja. En este caso se ha tomado como mejor modelo el que reduce el error medio ponderado de velocidades y temperaturas dando mayor relevancia a los datos correspondientes a la zona central de la muestra, ya que en la zona de entrada y salida se generan condiciones particulares de turbulencia que afectan a la propia medida experimental y difieren del comportamiento promedio de la muestra en general.

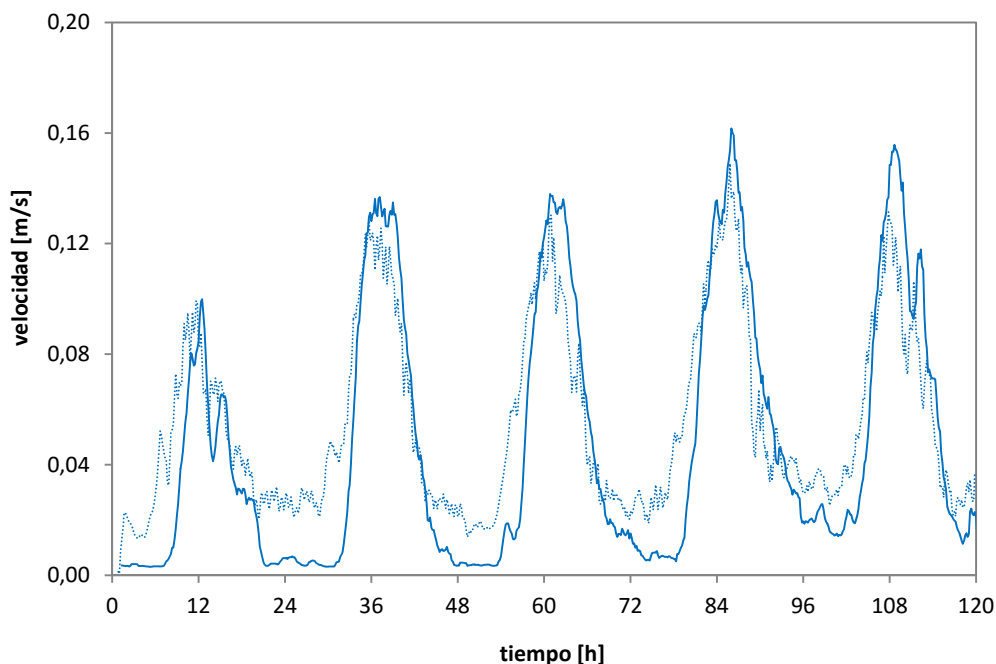


Figura D.15 –Validación del modelo *CFD* para las velocidades en la cámara ventilada

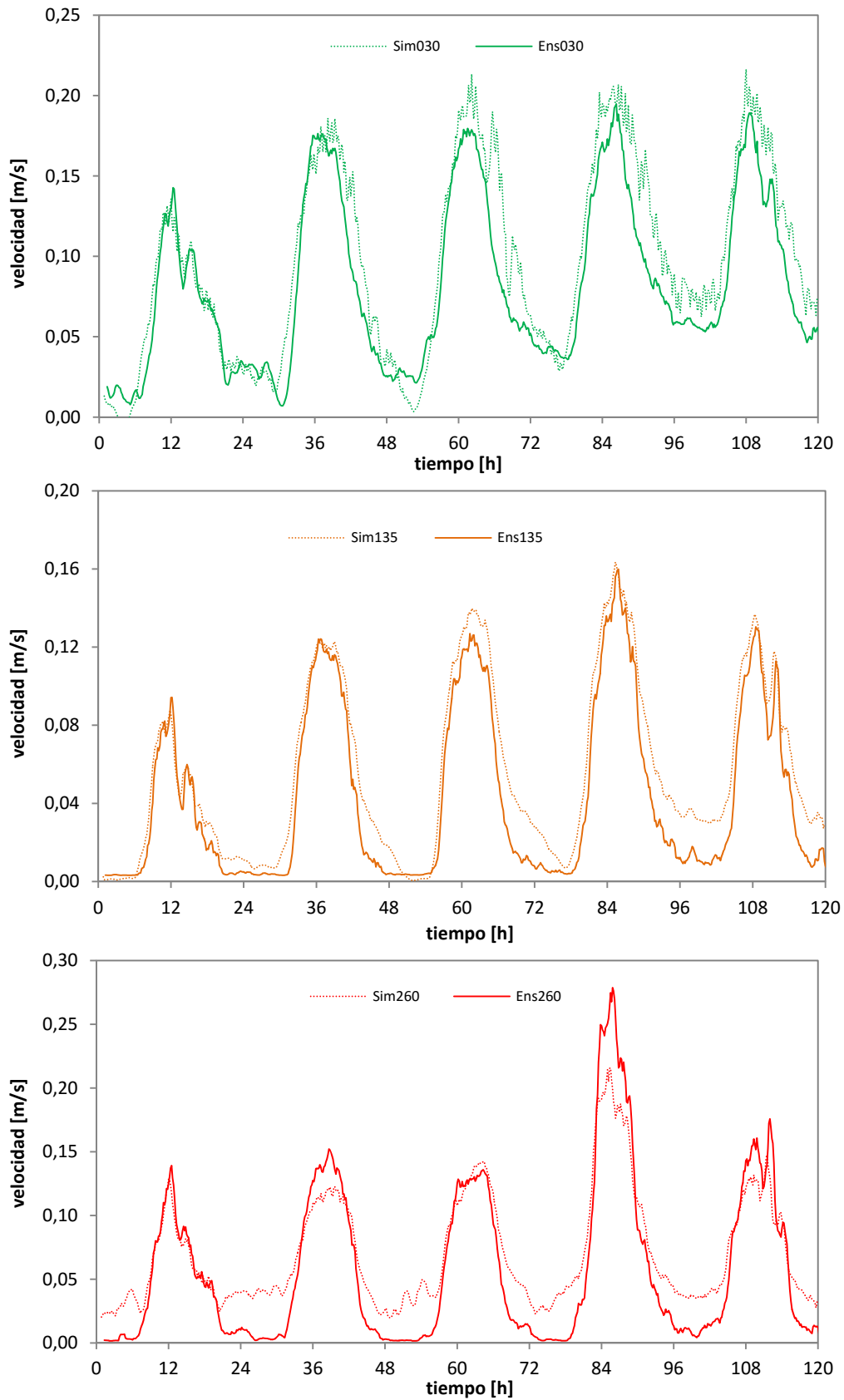


Figura D.16 –Validación del modelo CFD para las velocidades en la cámara ventilada

En la Figura D.17 y Figura D.18 se muestra el ajuste para temperaturas del aire en la cámara ventilada. El ajuste de las variables del aire dentro de la cámara ventilada es el aspecto más complicado. El modelo físico-matemático de la cámara de aire es el componente que mayor grado de definición necesita y donde mayor número de hipótesis de cálculo y simplificaciones se aplican. Por tanto, se considera que el ajuste obtenido es muy correcto y válido para realizar el estudio posterior de factores eficientes.

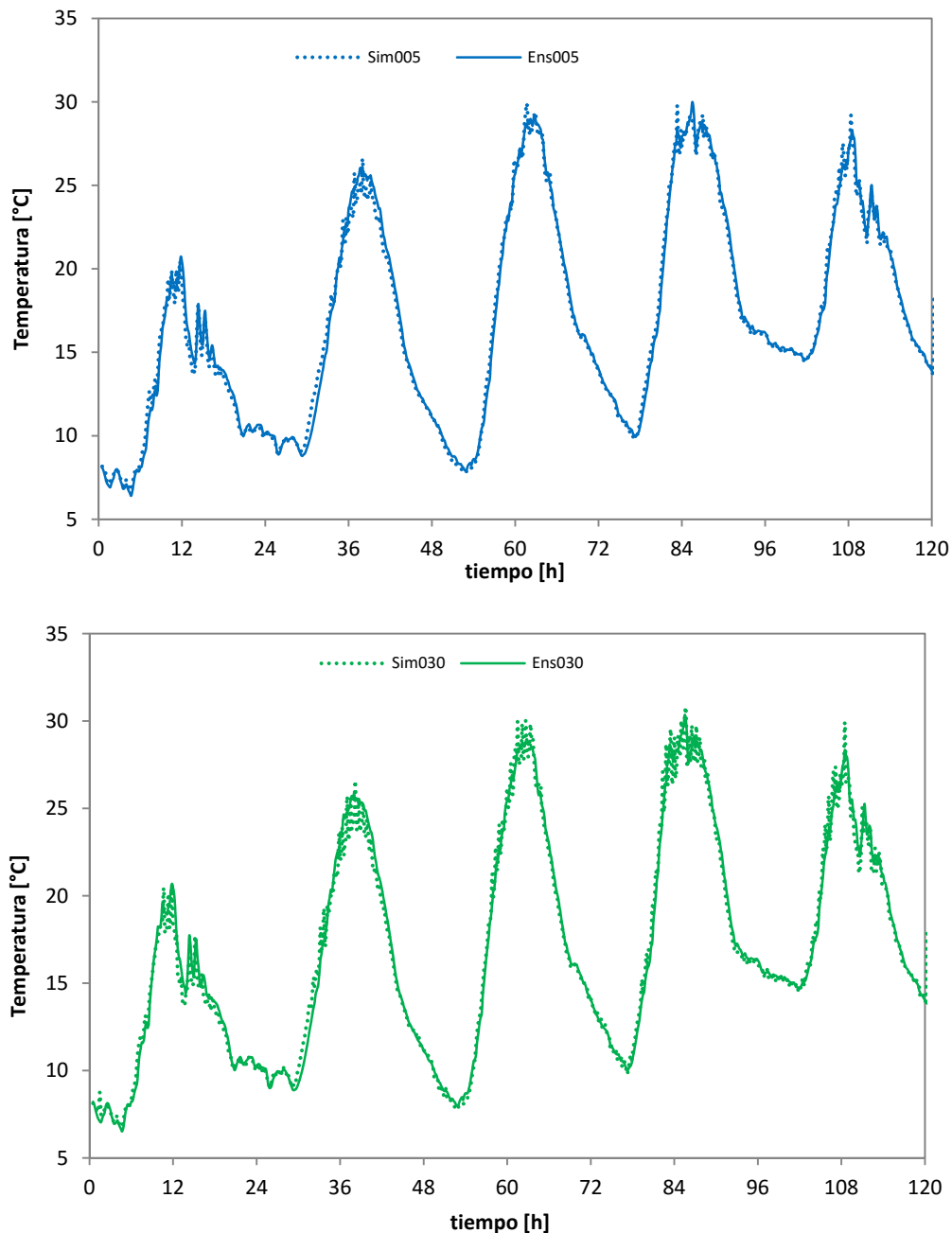


Figura D.17 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la cámara ventilada

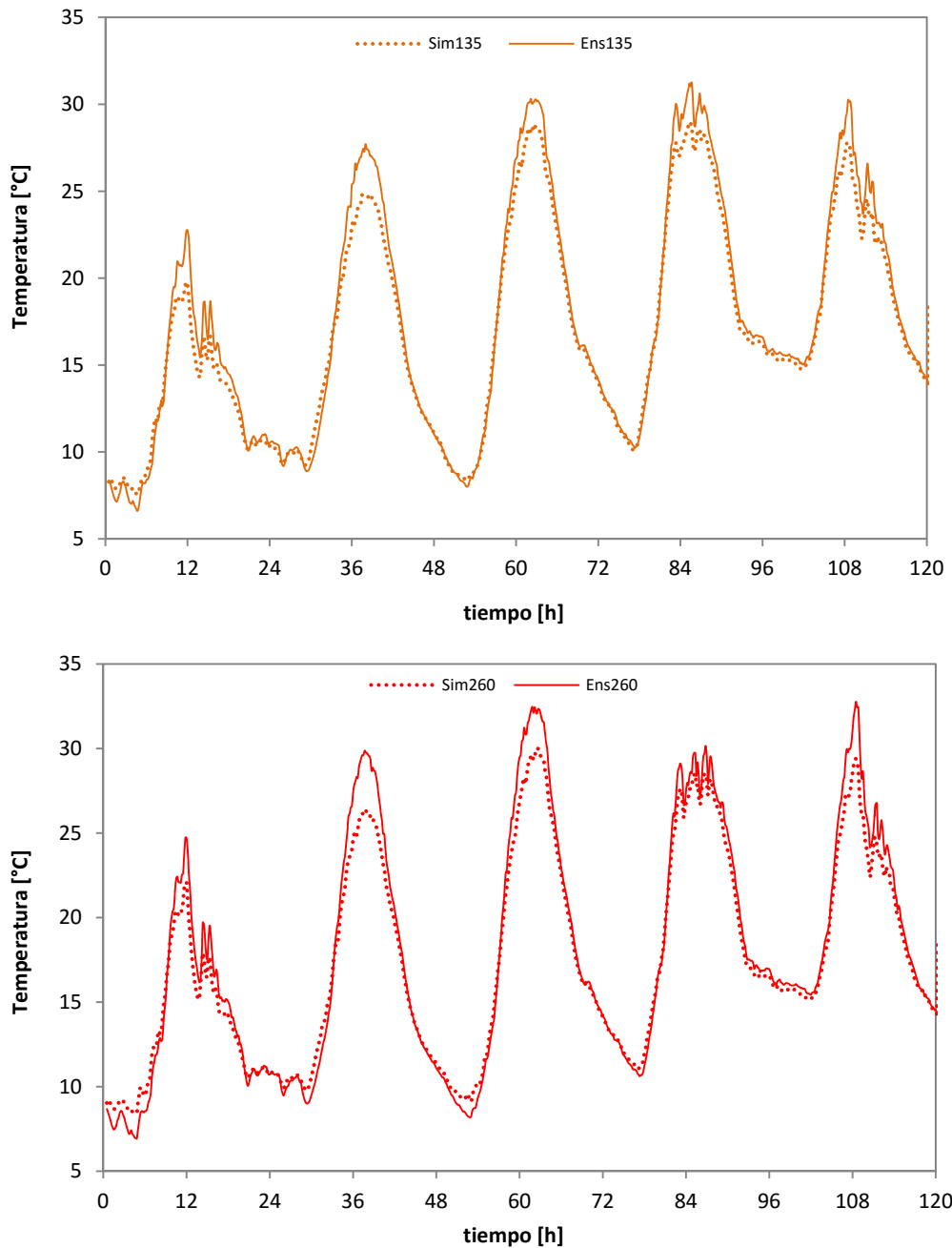


Figura D.18 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la cámara ventilada

Una vez contrastadas las variables del aire en la cámara ventilada se muestran los resultados para las temperaturas de las superficies que la conforman y para la superficie exterior de la fachada. En la Figura D.19 y en la Figura D.20 se muestra la comparativa entre los valores del modelo y experimentales de las temperaturas de la superficie del aislamiento que corresponde con la superficie interior de la cámara de aire definida como *Capa 5* de la muestra.

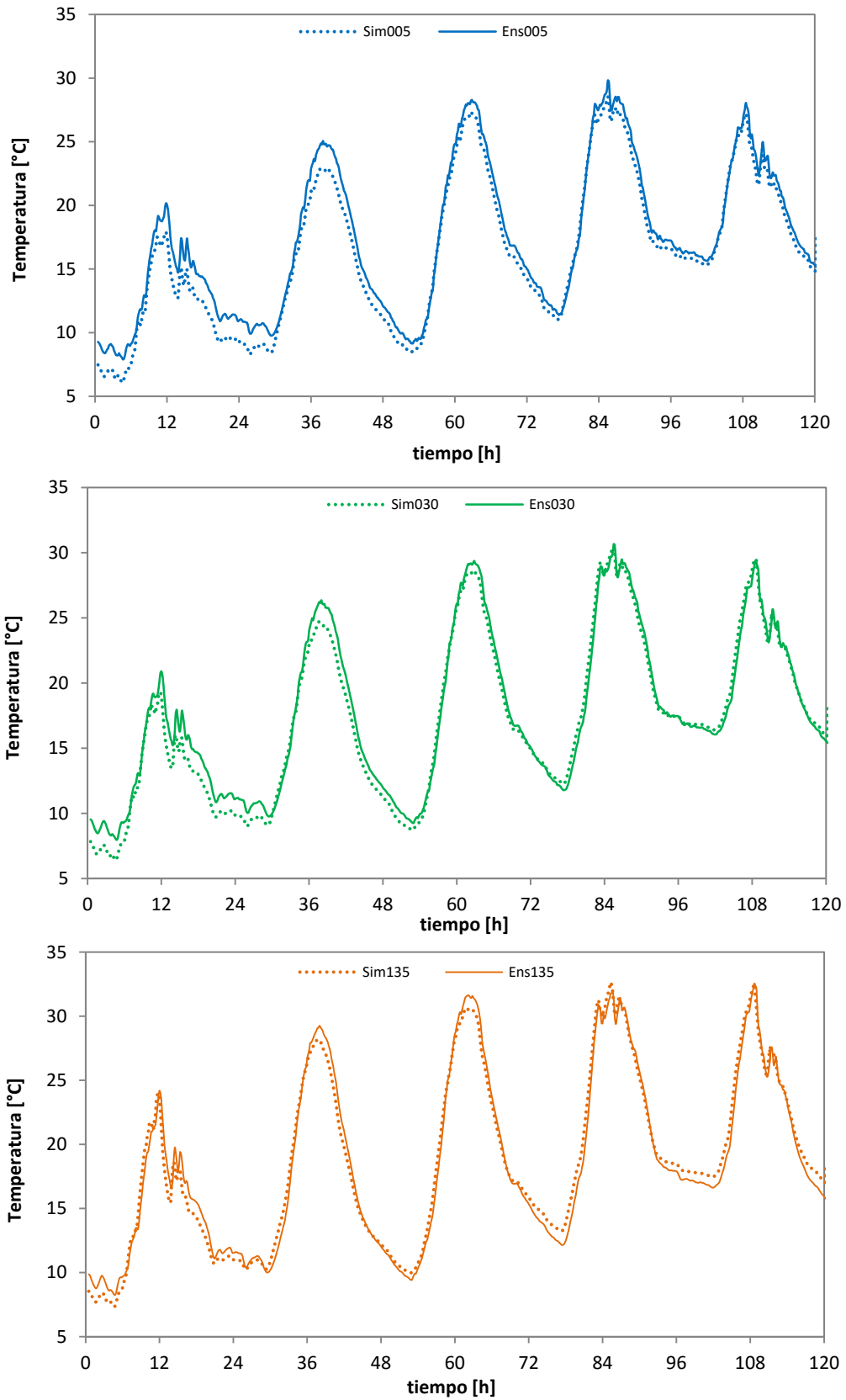


Figura D.19 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la capa 5, superficie aislante

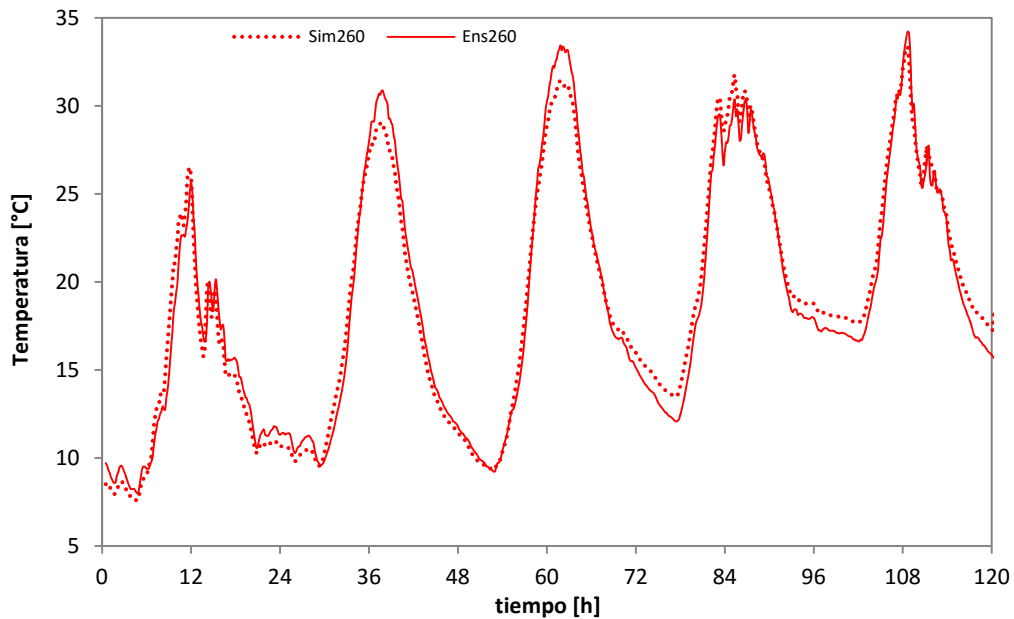


Figura D.20 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la capa 5, superficie aislante

De igual forma, en la Figura D.21 y en la Figura D.22 se muestra la comparativa para las temperaturas de la superficie de la placa de cemento, que configura la cara exterior de la cámara ventilada, y que se define como *Capa 6* en el esquema de la probeta.

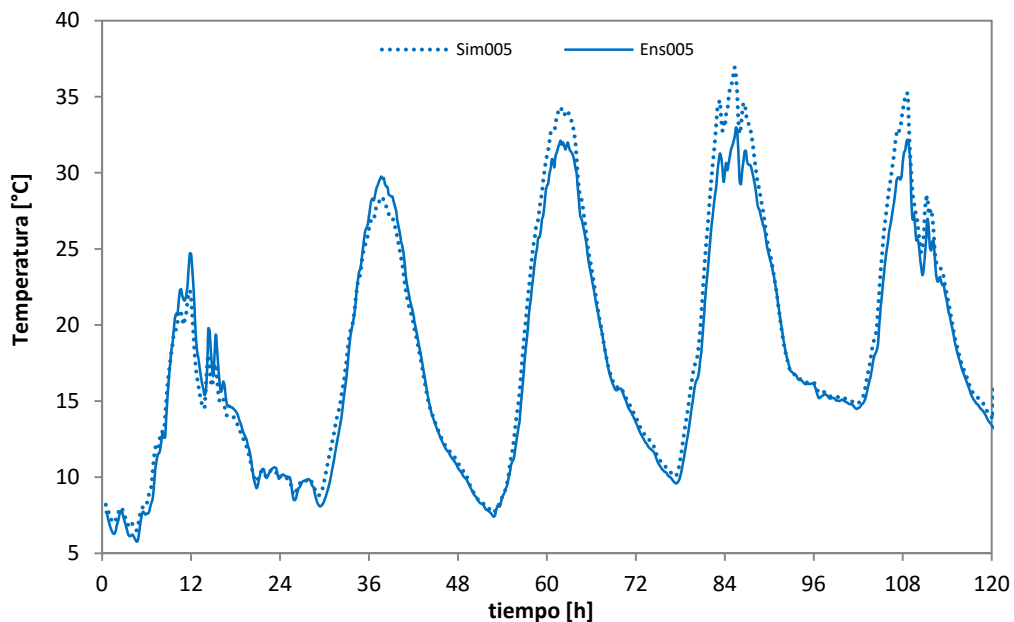


Figura D.21 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la capa 6, superficie placa de cemento

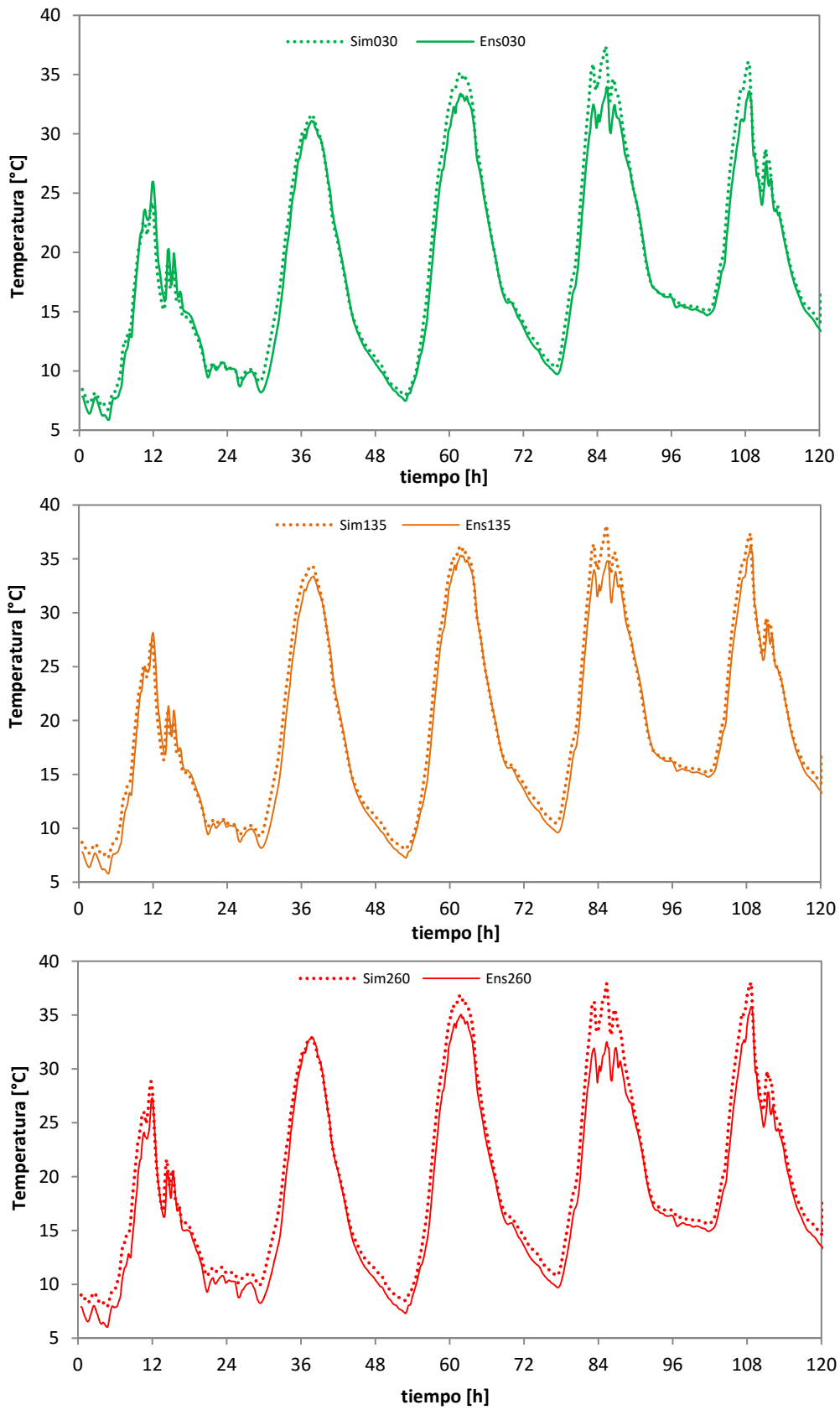


Figura D.22 –Validación del modelo CFD para las temperaturas en la capa 6, superficie placa de cemento

En la Tabla D.12 se recogen los errores medios obtenidos para cada una de las variables y cada punto de medida obtenidos.

Error Abs Velocidad [m/s]				
Altura [m]				
	0,05	0,30	1,35	2,60
FV-L	0,02	0,03	0,02	0,04

Error Abs Temperatura [°C]					
Altura [m]					
Capa		0,05	0,30	1,35	2,60
FV-L	5	1,0	0,8	0,8	0,9
	ca	0,4	0,5	0,8	0,9
	6	0,9	0,9	0,9	1,4

Tabla D.12 – Error absoluto de los modelos de volúmenes finitos en las dos tipologías de fachada ventilada

En la memoria, en el apartado de validación del modelo de CFD, se muestran una serie de imágenes correspondientes a los campos de temperaturas y velocidades del aire para cuatro instantes de tiempo representativos del comportamiento de la fachada ventilada. Por extensión del documento dichas imágenes se muestran en un tamaño reducido, a continuación se muestran con más detalla, de forma que se puede apreciar con más calidad la información del comportamiento de las diferentes capas de la muestra.

En la Figura D.23 y en la Figura D.24 se puede ver el comportamiento de la fachada a medido día, cuando la incidencia solar calienta la placa exterior de cemento que comienza a generar el proceso de flotación del aire dentro de la cámara ventilada. Pero aun está muy fría la superficie del aislante, de forma que el movimiento es lento y progresivo. En la Figura D.25 y en la Figura D.26 se muestra el estado de la fachada hacia el final de la tarde, cuando comienza a remitir la incidencia solar, de forma que la placa exterior comienza a enfriarse y la superficie del aislante pasa a ser la más caliente, pero debido a la inercia del movimiento, las velocidades siguen siendo continuas y con perfiles homogéneos.

En la Figura D.27 y en la Figura D.28 se muestra el estado correspondiente a la media noche, instante en el que se están enfriando por completo todas las superficies de la fachada y empieza a frenarse el movimiento de aire dentro de la cámara ventilada. Por último, en la Figura D.29 y en la Figura D.30 se muestra el instante de tiempo del amanecer, momento más fría del día, en el que el movimiento ascendente del aire es prácticamente nulo ó con zonas de reflujos y velocidades de descenso en la proximidad de la placa de cemento.

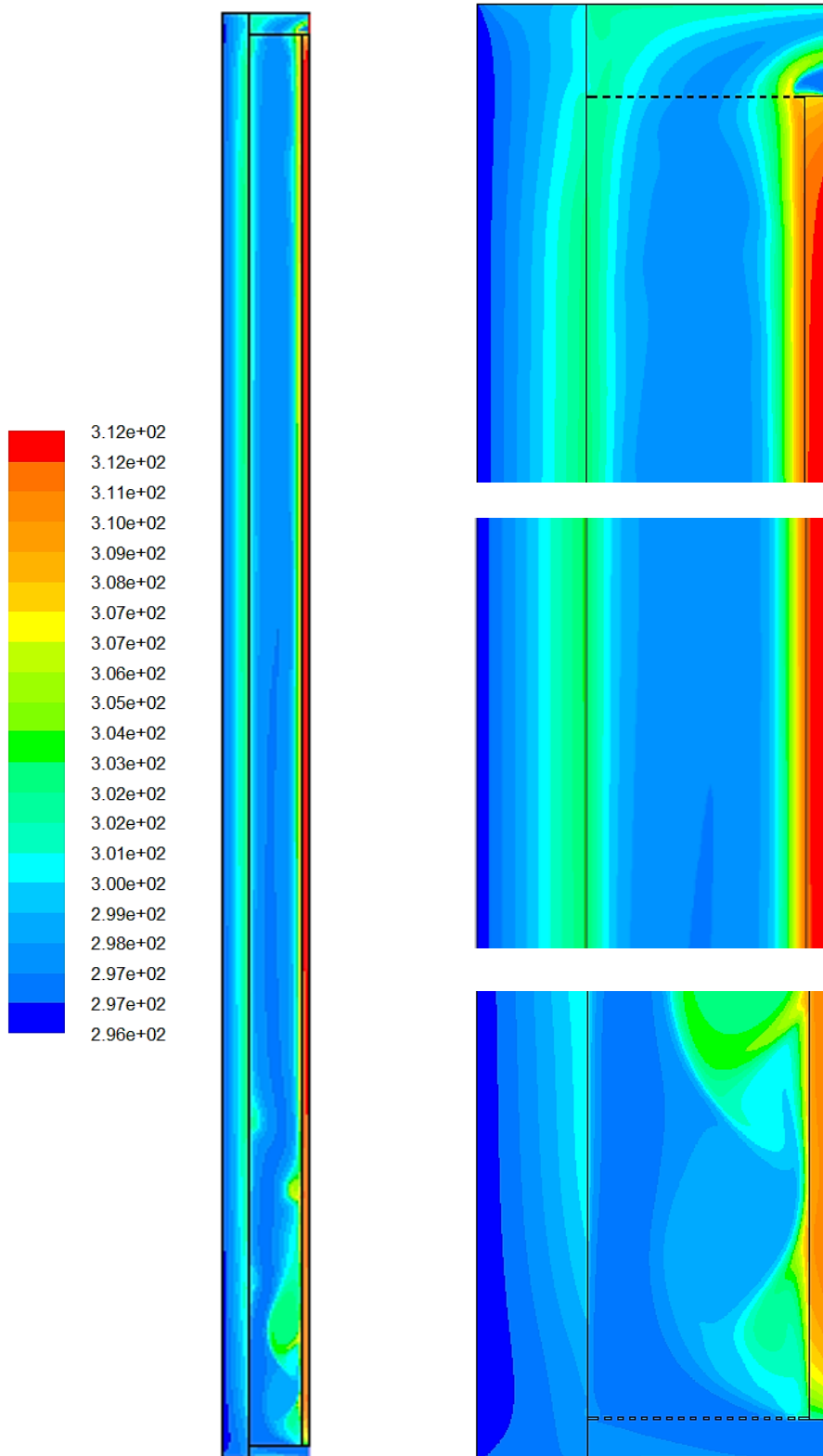


Figura D.23 –Campo de temperaturas para el instante de tiempo $t = 60$ [h]

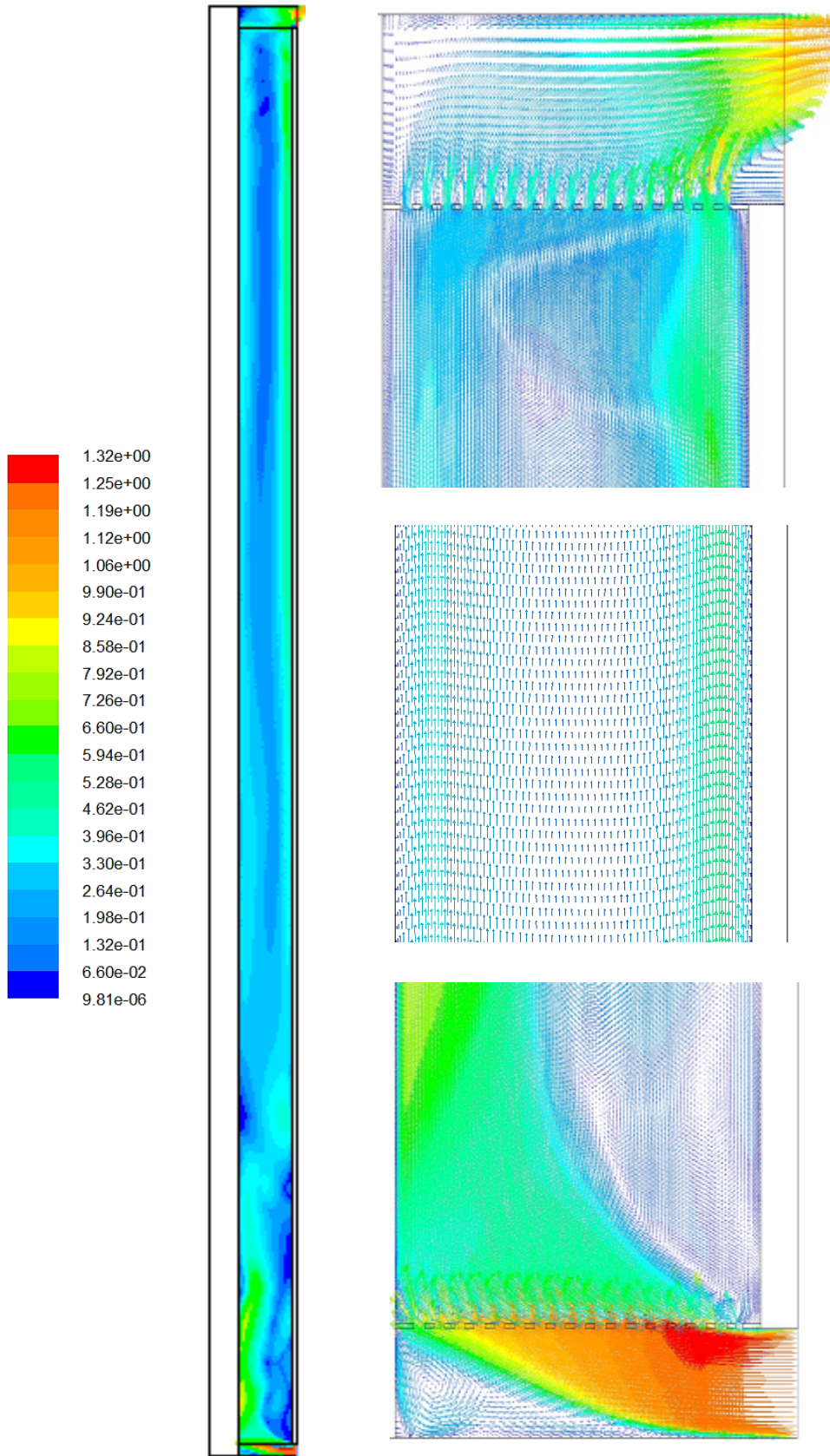


Figura D.24 –Campo de velocidades para el instante de tiempo $t = 60$ [h]

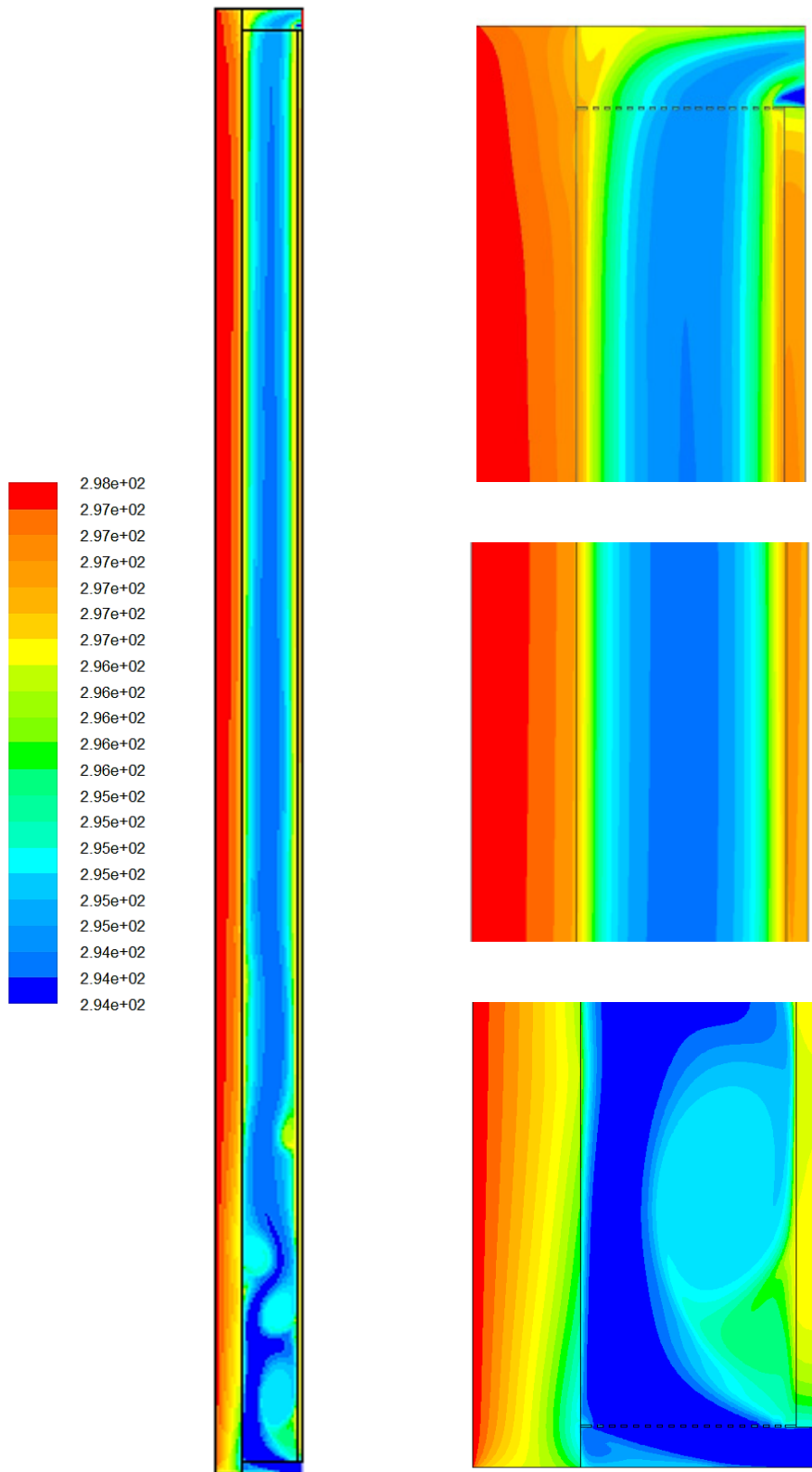


Figura D.25 –Campo de temperaturas para el instante de tiempo $t = 66$ [h]

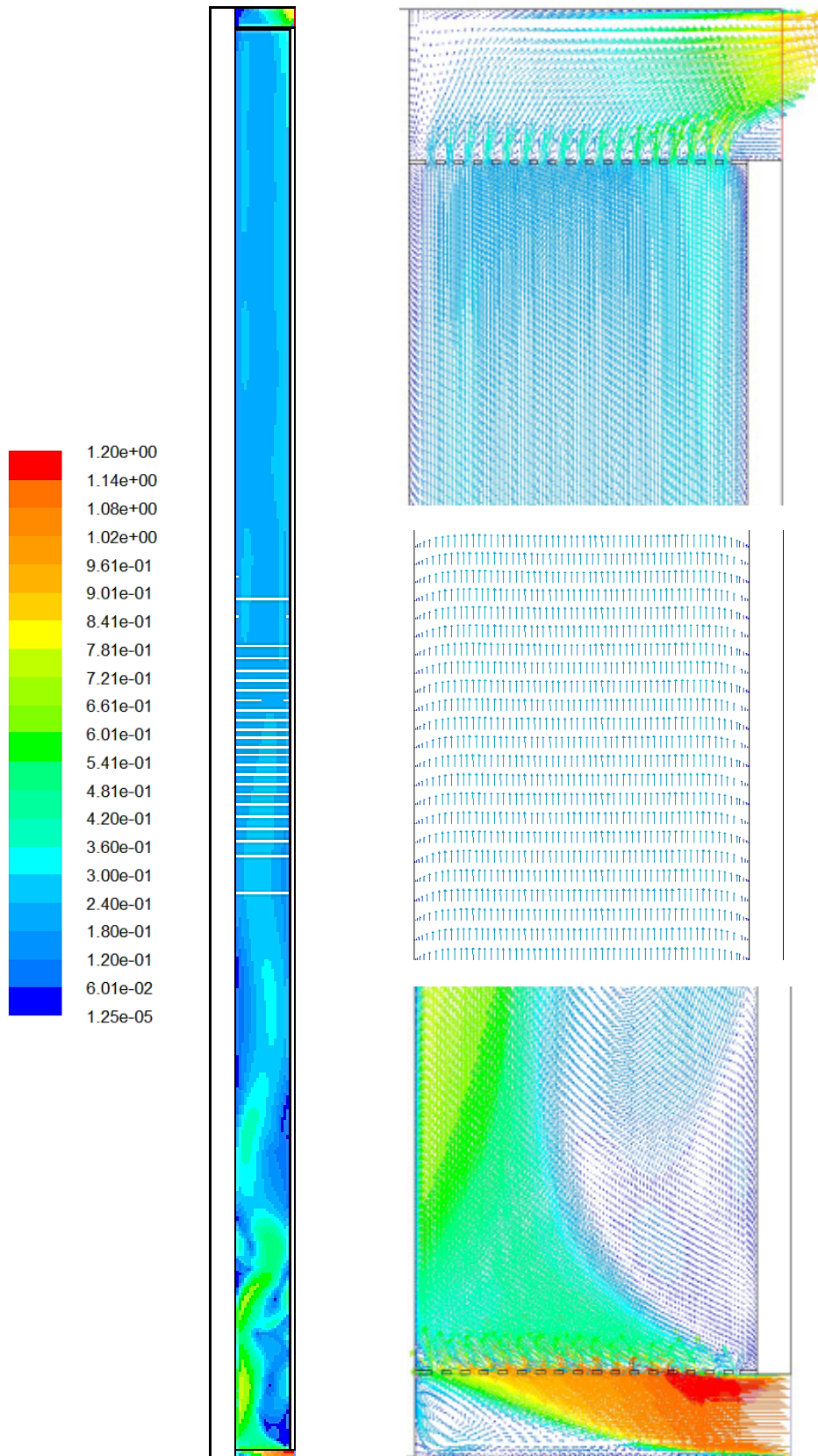


Figura D.26 –Campo de velocidades para el instante de tiempo $t = 66$ [h]

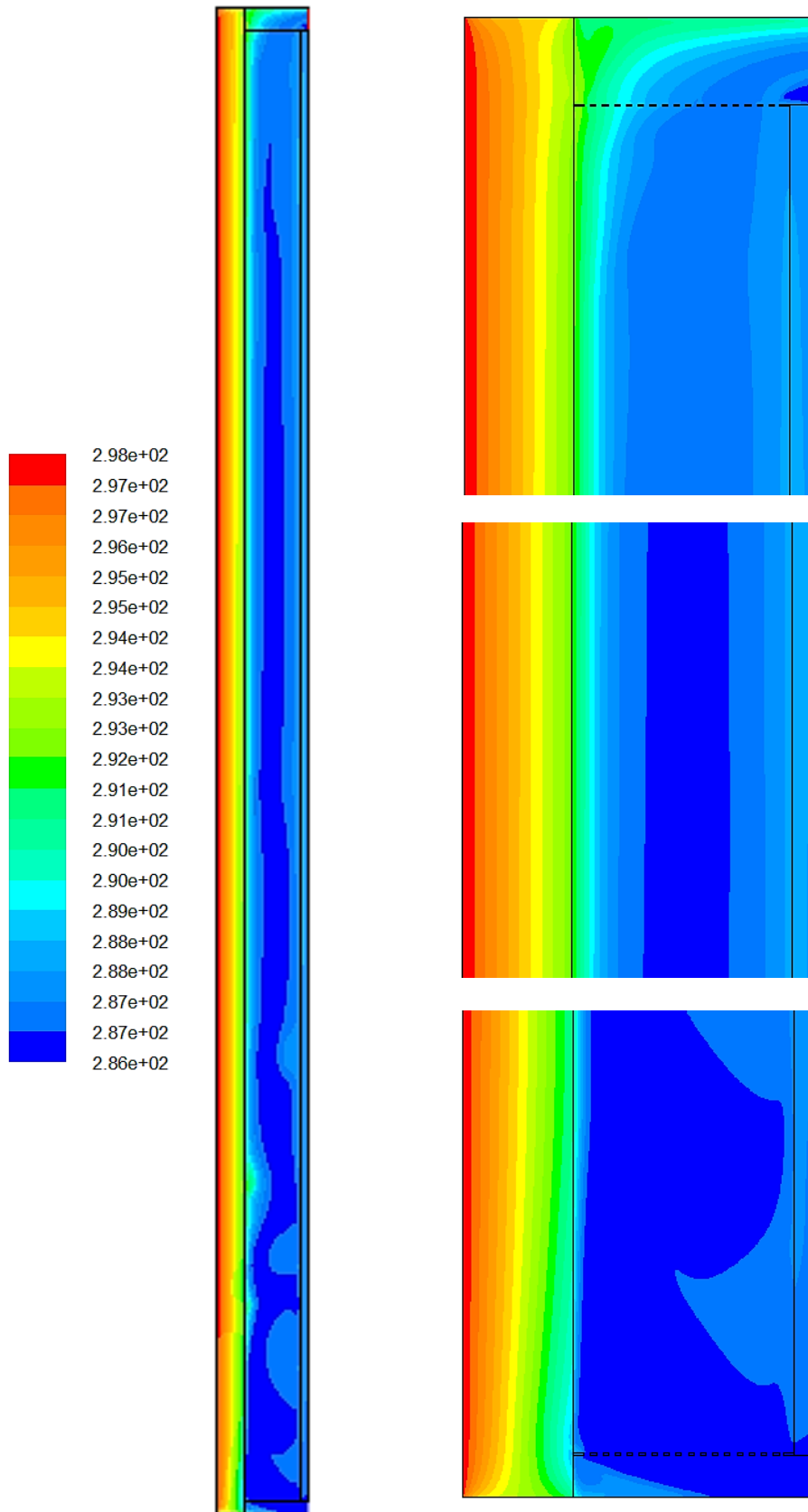


Figura D.27 –Campo de temperaturas para el instante de tiempo $t = 72$ [h]

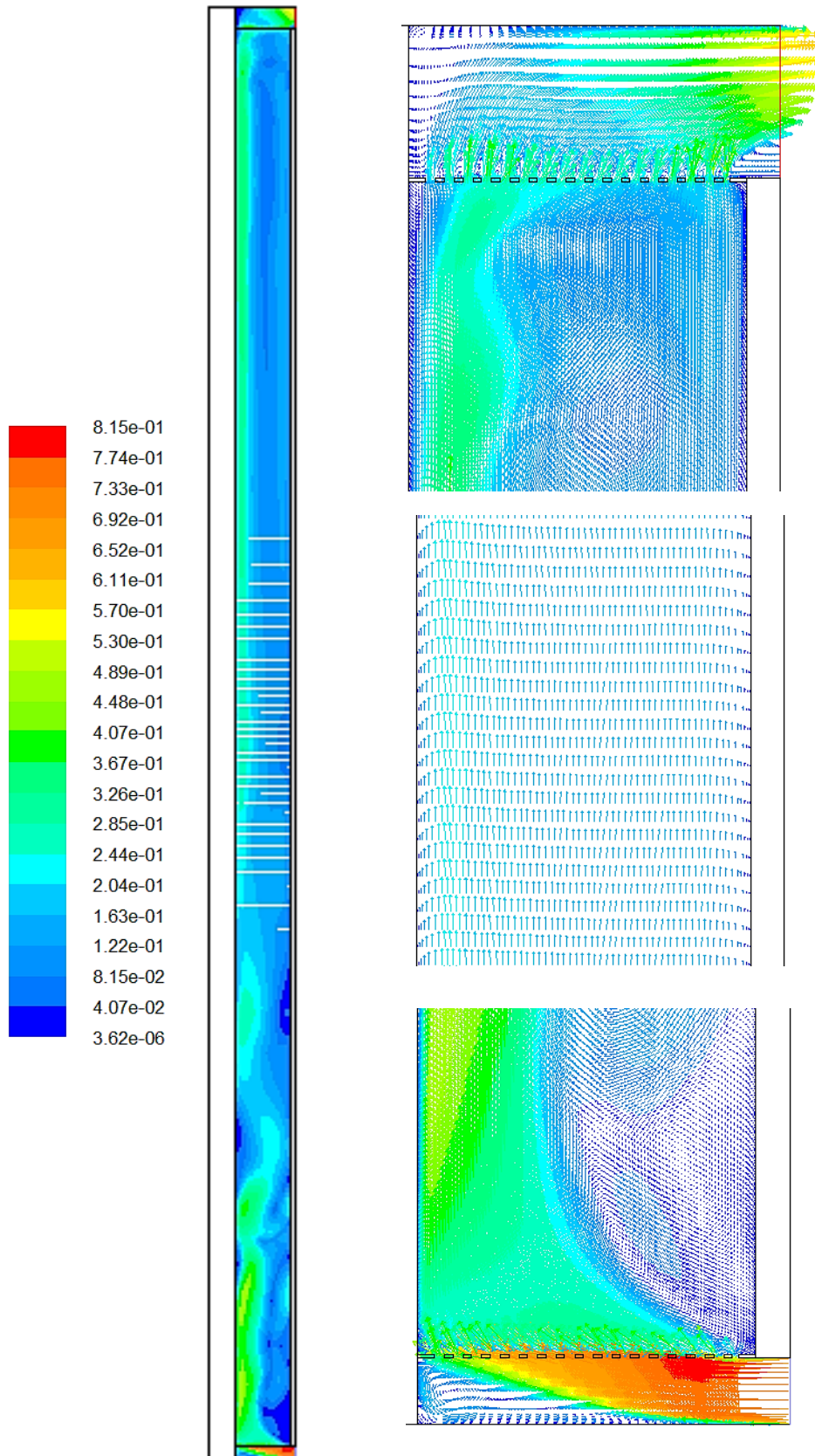


Figura D.28 –Campo de velocidades para el instante de tiempo $t = 72$ [h]

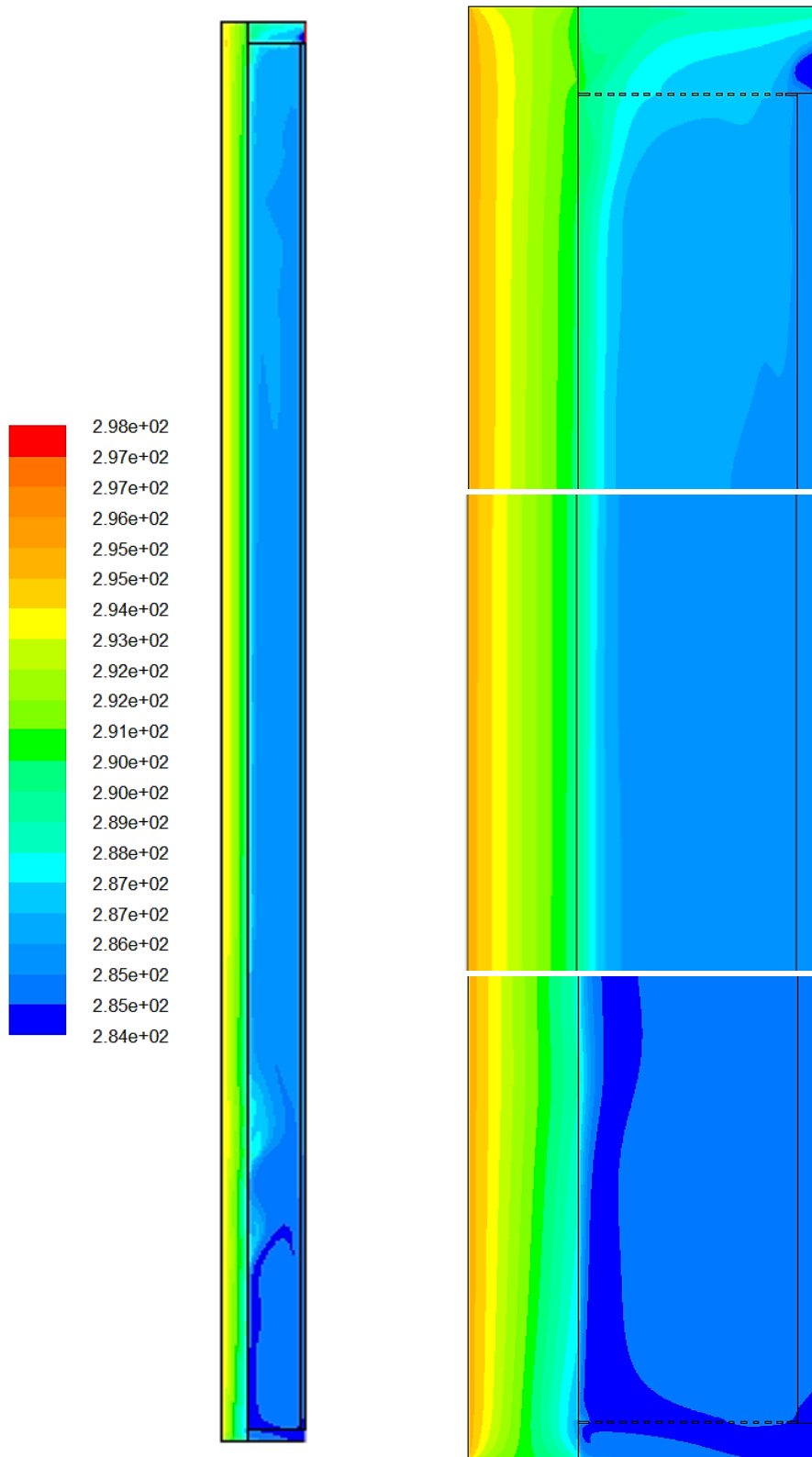


Figura D.29 –Campo de temperaturas para el instante de tiempo $t = 78$ [h]

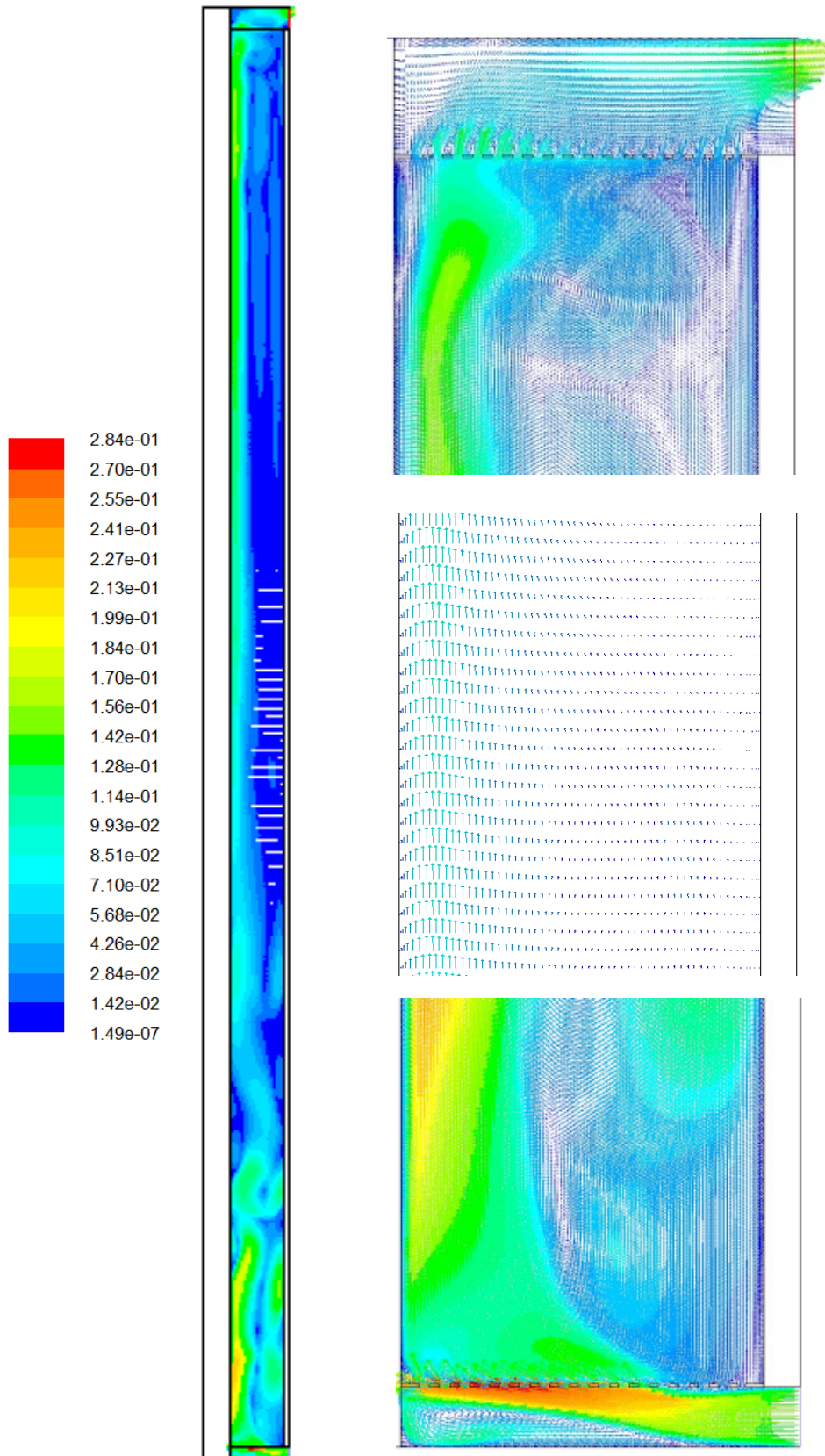


Figura D.30 –Campo de velocidades para el instante de tiempo $t = 78$ [h]

D.3.1.2 Factores de paso a valores eficientes de variables de ensayo

En la Tabla D.13 y Tabla D.14 se recogen las condiciones de temperatura y velocidad. En la columna f_{va} se indica el factor de corrección de la velocidad medida respecto a la velocidad eficiente, obtenida de integrar el perfil de velocidades en toda la sección de la cámara ventilada. Se incluyen todos los resultados disponibles, que se corresponden con 60 instantes de tiempo, obtenidos de analizar los datos cada dos horas en los cinco días en los que se ha realizado la simulación en CFD.

instante [h]	T_{ext} [°C]	T_{ca} [°C]	T_{c5} [°C]	T_{c6} [°C]	u_{135} [m/s]	Γ	f_{va}	e_{fva} [%]
2	7.63	8.23	9.41	7.79	0.004	-1.372	1.06	0.4
4	6.70	6.74	8.15	5.98	0.003	-1.536	1.07	1.4
6	9.65	8.87	9.75	8.15	0.003	-1.821	1.07	1.2
8	12.28	12.74	13.00	12.76	0.013	-0.927	1.06	0.5
10	17.37	20.66	20.17	23.49	0.095	1.174	1.06	0.3
12	14.55	19.30	20.41	22.56	0.070	0.659	1.05	0.6
14	14.41	18.15	18.72	20.44	0.086	0.747	1.05	1.1
16	13.29	15.70	16.29	16.61	0.038	0.357	1.04	2.1
18	12.14	13.79	14.44	14.10	0.029	-0.526	1.07	1.4
20	9.89	10.50	11.44	10.04	0.004	-1.498	1.04	1.3
22	10.03	10.63	11.36	10.25	0.004	-1.527	1.06	0.5
24	9.62	10.45	11.29	10.26	0.004	-1.221	1.05	0.9
26	9.28	9.73	10.55	9.29	0.003	-1.527	1.06	0.3
28	9.44	9.85	10.74	9.49	0.003	-1.404	1.06	0.0
30	11.76	10.00	10.59	9.34	0.003	-2.122	1.06	0.6
32	15.53	14.42	14.36	14.70	0.051	1.224	1.07	1.2
34	18.04	20.95	21.27	24.28	0.088	0.905	1.05	1.2
36	19.79	26.05	26.41	30.49	0.135	0.917	1.04	1.6
38	21.52	26.94	27.46	31.00	0.115	0.871	1.05	0.9
40	20.73	24.17	24.20	25.91	0.103	0.979	1.06	0.5
42	18.09	19.33	19.49	19.46	0.042	-0.158	1.03	3.2
44	14.06	14.42	14.97	14.02	0.010	-1.742	1.05	0.4
46	11.86	12.20	12.90	11.63	0.006	-1.830	1.05	1.1
48	10.62	10.79	11.67	10.16	0.003	-1.712	1.08	1.8
50	8.29	9.16	10.32	8.59	0.003	-1.489	1.07	0.8
52	7.43	8.18	9.41	7.54	0.003	-1.513	1.04	1.3
54	8.03	9.34	10.54	9.56	0.004	-0.822	1.06	0.0
56	14.81	14.55	14.69	14.90	0.040	0.603	1.06	0.2
58	20.44	22.90	22.90	25.97	0.100	1.002	1.07	1.5

Tabla D.13 – Factores de corrección de la velocidad en la cámara ventilada

instante [h]	T_{ext} [°C]	T_{ca} [°C]	T_{c5} [°C]	T_{c6} [°C]	u_{135} [m/s]	Γ	f_{va}	e_{fva} [%]
60	24.04	27.90	28.52	32.26	0.107	0.859	1.06	0.2
62	26.43	29.81	30.38	33.31	0.125	0.837	1.04	1.3
64	24.19	26.43	26.77	28.00	0.095	0.780	1.05	0.5
66	21.04	21.79	22.13	22.00	0.033	-0.392	1.06	0.1
68	16.55	17.16	17.84	16.75	0.011	-1.611	1.06	0.1
70	14.93	15.54	16.39	15.20	0.008	-1.401	1.08	1.6
72	13.07	13.57	14.69	13.04	0.009	-1.472	1.08	2.0
74	11.58	12.15	13.51	11.59	0.005	-1.408	1.06	0.6
76	9.86	10.68	12.23	10.08	0.004	-1.387	1.04	1.5
78	11.99	11.91	13.09	11.37	0.011	-1.461	1.05	1.1
80	16.25	16.72	17.41	17.32	0.037	-0.126	1.05	0.9
82	23.46	25.98	26.00	28.99	0.111	0.992	1.05	0.5
84	25.47	28.56	28.72	31.13	0.147	0.937	1.07	0.7
86	26.03	29.00	29.27	31.42	0.138	0.889	1.07	1.3
88	25.30	27.20	27.48	28.19	0.110	0.711	1.07	1.5
90	21.86	23.48	24.09	23.87	0.058	-0.367	1.05	0.6
92	16.88	17.97	19.05	17.82	0.030	-1.137	1.06	0.2
94	15.67	16.60	17.77	16.41	0.021	-1.163	1.08	1.6
96	15.28	15.95	17.17	15.55	0.009	-1.331	1.05	1.0
98	14.80	15.65	16.89	15.37	0.010	-1.231	1.07	0.8
100	14.45	15.33	16.59	15.09	0.009	-1.191	1.06	0.5
102	14.41	15.27	16.44	14.99	0.013	-1.246	1.06	0.2
104	16.98	18.30	19.17	18.97	0.032	-0.226	1.04	2.0
106	22.52	25.38	26.14	28.63	0.112	0.766	1.07	0.9
108	25.47	29.91	30.87	34.20	0.135	0.776	1.07	1.0
110	20.15	23.38	24.41	24.89	0.070	0.314	1.05	1.0
112	19.69	23.05	24.11	24.48	0.065	0.261	1.05	0.5
114	19.13	20.50	21.27	20.57	0.041	-0.911	1.06	0.2
116	16.35	17.04	18.21	16.51	0.017	-1.450	1.06	0.2
118	14.64	15.23	16.53	14.55	0.020	-1.521	1.07	1.4
120	13.37	13.96	15.49	13.28	0.008	-1.445	1.06	0.0

Tabla D.14 – Factores de corrección de la velocidad en la cámara ventilada

D.3.2 Modelo de parámetros concentrados

En la Figura D.31 se muestra el modelo empleado para analizar el comportamiento completo de la fachada ventilada ligera. En la parte superior se muestra la parte correspondiente al muro base con aislamiento, de forma que su definición es idéntica a la del modelo de la Figura D.11, salvo que en este caso la capa de aislamiento no presenta el revestimiento superficial de mortero de la fachada exterior. Y en la parte inferior se muestra la parte del modelo que reproduce el comportamiento de la cámara ventilada y de la placa ligera exterior de cemento, hasta las condiciones ambientales exteriores.

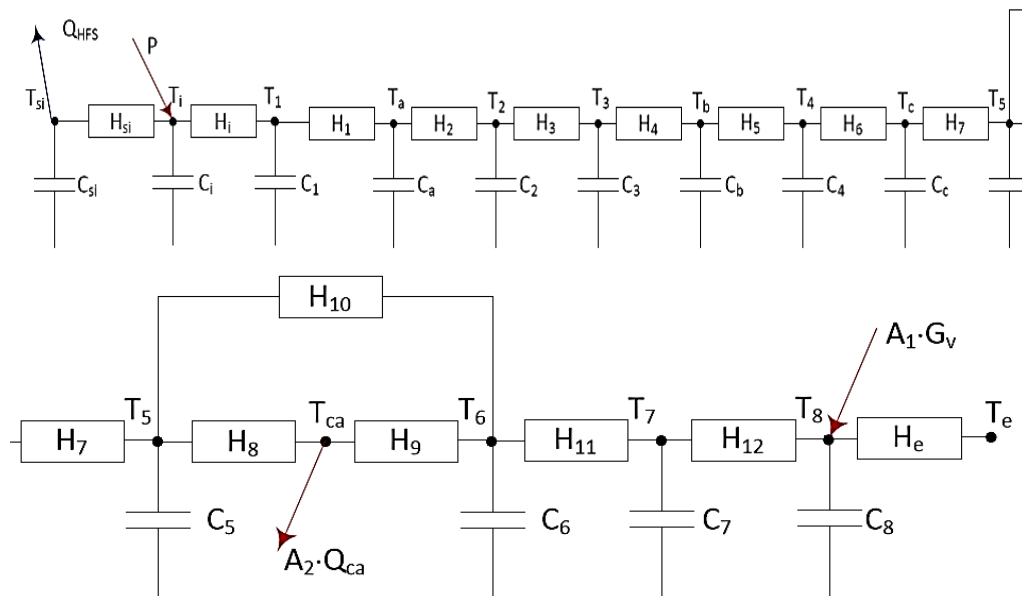


Figura D.31 – Modelo de celda para el muro base con la fachada ventilada ligera

Se trata del modelo más complejo que se resuelve en el presente trabajo de tesis, debido al orden orden, lo que implica un elevado número de variables, parámetros y funciones objetivo. Además, a esta complejidad hay que sumarle que las conductancias que representan el comportamiento de la cámara de aire ventilada son variables en el tiempo, dependiendo de la velocidad y temperaturas del aire y de las superficies que la conforman. Este aspecto se resuelve incluyendo en el modelo las ecuaciones algebraicas necesarias para representar ese comportamiento y pasando a variables de ajuste los coeficientes de dichas ecuaciones. Esto exige introducir como datos de entrada al modelo la velocidad medida de aire, v_{ca} , y el coeficiente de radiación entre superficies, H_{rad} . Las ecuaciones del modelo se muestran en [D.9], [D.10] y [D.11]. La resolución de un modelo de estas características con las herramientas de identificación de parámetros es muy compleja. Exige ir resolviendo el modelo de forma progresiva, es decir, primero se define una parte del modelo, se obtienen resultados fiables, se fijan, se amplía el modelo para obtener los resultados de las variables ampliadas, que se toman como valor inicial para una nueva resolución, esta vez con toda la parte del modelo variable. Este proceso se repite progresivamente hasta obtener un modelo completo en el cual todas las variables son libres, pero que parte de un estado inicial muy próximo a los valores definitivos de las variables que lo conforman.

$$\begin{bmatrix} T_{si}^m \\ T_i^m \\ T_1^m \\ T_2^m \\ T_3^m \\ T_4^m \\ T_5^m \\ T_6^m \\ T_8^m \\ Q_{ca}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_8}{A_2} & \frac{H_9}{A_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{si} \\ T_i \\ T_1 \\ T_a \\ T_2 \\ T_3 \\ T_b \\ T_4 \\ T_c \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{HFS} \\ P \\ T_{ca} \\ T_e \\ G_v \end{bmatrix} + [e] \quad [D.10]$$

$$H_8 = a_8 + b_8 \cdot v_{ca}$$

$$H_9 = a_9 + b_9 \cdot v_{ca}$$

$$H_{10} = P_0 \cdot H_{rad}$$

$$[D.11]$$

En la Tabla D.15 a Tabla D.18 se muestran los resultados del proceso de identificación de parámetros junto con el análisis de residuos, Figura D.32 y Figura D.33.

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
a₈	1	100	2000	1.31E+01	6.34E-01	48.5608	-0.0049	-0.0036
b₈	1	100	2000	9.50E+02	9.36E+01	79.0844	-0.0017	-0.0047
a₉	1	100	2000	2.84E+01	9.17E-01	96.0135	-0.0001	0.0031
b₉	1	100	2000	7.85E+02	2.51E+01	51.4528	-0.0043	-0.0005
P₀	10	500	1000	7.79E+00	1.12E+00	11.0639	-0.0007	-0.0001
H_{si}	100	250	500	4.58E+02	4.34E+01	86.7457	-0.0026	0.0027
C_{si}	100	1000	2000	8.40E+02	3.83E+01	7.9084	0.0028	0.0024
H_i	1	50	100	3.68E+01	2.38E+00	88.1855	-0.0005	-0.0035
C_i	1	50	100	8.57E+01	6.55E+00	5.8316	0.0015	0.0008
H₁	10	500	1000	1.02E+02	6.38E+00	35.7495	0.0029	0.0022
C₁	1	10	500	7.57E+01	1.20E+01	62.9888	-0.0021	0.0028
C_a	1	10	500	3.56E+02	1.30E+01	79.9540	0.0017	-0.0014
H₂	10	500	1000	6.74E+01	4.24E+00	81.4567	-0.0015	-0.0019
C₂	1	10	500	1.10E+02	3.60E+01	51.0349	-0.0004	-0.0022
H₃	10	500	1000	3.95E+01	4.56E+00	44.6598	0.0027	-0.0014
C₃	1	10	500	2.97E+02	8.97E+00	33.4197	-0.0011	0.0032
H₄	10	500	1000	7.73E+01	5.52E+00	64.0312	0.0022	-0.0007
C_b	1	10	500	1.18E+03	6.36E+00	33.6482	0.0037	0.0028
H₅	10	500	1000	9.94E+01	3.37E+00	92.4759	0.0047	0.0034
C₄	1	10	500	4.78E+02	1.37E+02	32.3152	-0.0008	0.0008
H₆	1	50	200	1.44E+01	7.67E-01	24.7100	0.0043	0.0013
C_c	1	50	200	4.57E+01	3.42E+00	21.8883	-0.0037	0.0006
H₇	1	50	200	1.15E+01	1.80E-01	7.8362	0.0006	0.0016
C₅	1	50	200	4.32E+00	8.12E+00	89.7410	-0.0026	0.0045
C₆	1	50	500	4.90E+01	8.88E-01	47.4623	0.0023	0.0028
H₁₁	100	1000	2000	6.56E+02	8.65E+00	26.8465	-0.0018	-0.0005

Tabla D.15 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo de fachada ventilada ligera

variable	valor min.	valor inicial	valormax.	valor estimado	std. dev.	t-score	dF/dPar	dPen/dPar
C ₇	1	50	500	1.79E+02	3.87E+01	0.813	-0.0014	0.0031
H ₁₂	100	1000	2000	1.52E+02	2.59E+01	91.552	-0.0016	-0.0009
C ₈	1	50	500	4.85E+01	2.19E+01	96.571	-0.0002	-0.0001
H _e	1	150	300	1.77E+02	1.74E+01	42.453	0.0002	0.0013
A ₁	1	5	7	5.86E+00	5.09E-01	95.385	-0.0018	0.0001
A ₂	0.9	1	1.1	1.07E+00	5.74E-02	74.214	-0.0025	0.0044

Tabla D.16 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo de fachada ventilada ligera

	a ₈	b ₈	a ₉	b ₉	P ₀	H _{si}	C _{si}	H _i	C _i	H ₁	C ₁	C _a	H ₂	C ₂	H ₃	C ₃	H ₄	C _b	H ₅	C ₄	H ₆	C _c	
a ₈	1																						
b ₈	0.3	1																					
a ₉	-0.1	-0.5	1																				
b ₉	-0.4	0.0	0.1	1																			
P ₀	-0.2	0.1	-0.3	0.0	1																		
H _{si}	-0.4	0.4	0.0	0.1	0.2	1																	
C _{si}	-0.3	-0.1	-0.5	0.0	-0.4	-0.4	1																
H _i	-0.3	0.0	-0.2	-0.2	-0.5	-0.5	-0.2	1															
C _i	0.3	-0.4	0.1	0.0	0.4	-0.4	-0.1	0.4	1														
H ₁	0.1	0.0	0.3	0.1	0.3	-0.4	0.2	0.4	0.2	1													
C ₁	-0.5	-0.3	-0.1	-0.1	0.4	-0.5	0.4	-0.1	-0.2	0.4	1												
C _a	0.3	0.3	-0.3	-0.1	-0.2	0.3	0.2	0.3	0.1	0.0	-0.5	1											
H ₂	-0.3	-0.1	0.0	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3	0.1	-0.2	-0.2	-0.4	1										
C ₂	0.1	-0.3	0.4	0.0	-0.4	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.4	0.0	-0.4	-0.2	1									
H ₃	-0.3	0.1	0.4	-0.2	-0.2	-0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.4	-0.2	0.3	1								
C ₃	-0.2	-0.3	-0.1	-0.3	-0.3	0.2	0.4	0.0	-0.1	0.4	-0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.5	1							
H ₄	-0.1	0.2	-0.2	0.2	0.2	0.1	-0.1	0.0	0.3	-0.4	0.1	0.1	-0.4	-0.2	0.0	0.1	1						
C _b	0.1	-0.4	0.1	-0.1	-0.2	0.2	-0.1	-0.3	0.0	0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.4	0.2	-0.5	1					
H ₅	0.0	0.0	0.4	0.5	-0.3	0.0	-0.1	0.3	0.3	-0.5	-0.3	0.4	0.0	-0.4	0.3	0.0	0.1	0.1	1				
C ₄	0.0	-0.1	0.1	0.3	0.0	-0.3	0.0	0.4	0.3	-0.5	-0.2	-0.1	0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	0.3	1			
H ₆	0.4	0.2	-0.4	0.3	0.1	-0.4	-0.2	0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.1	-0.4	0.3	0.4	0.3	-0.3	-0.4	0.4	1		
C _c	0.4	-0.2	0.0	-0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	-0.5	0.3	0.2	0.5	0.4	-0.1	0.1	-0.4	-0.4	-0.1	-0.5	-0.4	0.5	1	
H ₇	-0.1	0.3	0.1	0.5	0.3	-0.2	-0.3	-0.5	-0.1	-0.2	-0.2	0.1	-0.1	0.5	0.0	-0.2	0.0	0.1	0.3	0.2	0.5	0.2	
C ₅	-0.5	0.5	0.2	-0.1	0.3	0.1	0.3	0.4	0.3	-0.3	-0.3	0.3	-0.5	-0.2	0.0	-0.2	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	
C ₆	0.4	-0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	-0.3	-0.2	0.0	-0.3	-0.5	-0.4	0.2	-0.5	-0.1	0.5	-0.2	-0.5	-0.2	-0.4	0.1	0.2	
H ₁₁	-0.2	-0.2	0.0	-0.1	0.1	0.2	0.1	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	0.5	0.2	-0.4	-0.1	-0.2	0.1	-0.4	-0.2	-0.3	0.3	-0.1	
C ₇	0.1	-0.4	0.0	0.2	-0.2	0.5	-0.3	0.4	0.5	0.5	-0.2	0.5	0.0	0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.3	0.1	
H ₁₂	-0.2	0.1	-0.2	0.2	0.4	0.1	-0.4	-0.1	0.1	-0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	-0.5	0.4	0.1	0.3	0.4	-0.2	0.3	0.4	
C ₈	-0.5	-0.4	0.2	-0.4	-0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	-0.4	0.4	-0.4	-0.5	0.5	0.4	0.4	0.0	0.2	0.3	0.2	-0.1	-0.4	
H _e	0.4	0.3	-0.5	0.4	0.1	-0.3	0.4	0.3	0.4	-0.5	0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	0.2	0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.1	0.4	
A ₁	-0.3	-0.1	0.4	-0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	-0.5	-0.4	-0.4	0.2	0.1	0.5	0.1	0.0	-0.4	0.1	0.2	-0.2	
A ₂	-0.3	-0.1	-0.4	-0.3	-0.5	0.1	0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	-0.3	-0.3	-0.1	-0.4	0.0	0.4	-0.4	-0.3	0.2	

Tabla D.17 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo de fachada ventilada ligera

	H ₇	C ₅	C ₆	H ₁₁	C ₇	H ₁₂	C ₈	H _e	A ₁	A ₂
H ₇	1									
C ₅	0.2	1								
C ₆	-0.5	-0.3	1							
H ₁₁	0.3	0.1	-0.5	1						
C ₇	0.0	0.3	-0.1	-0.3	1					
H ₁₂	-0.1	0.2	-0.4	0.0	-0.1	1				
C ₈	-0.2	0.4	-0.3	-0.2	0.2	0.1	1			
H _e	0.4	0.3	0.4	-0.5	0.3	0.1	0.5	1		
A ₁	-0.4	0.0	0.4	0.3	-0.4	-0.2	-0.3	0.3	1	
A ₂	0.2	0.2	0.5	0.5	0.1	-0.1	0.3	0.4	0.3	1

Tabla D.18 – Resultados identificación parámetros para el modelo completo de fachada ventilada ligera

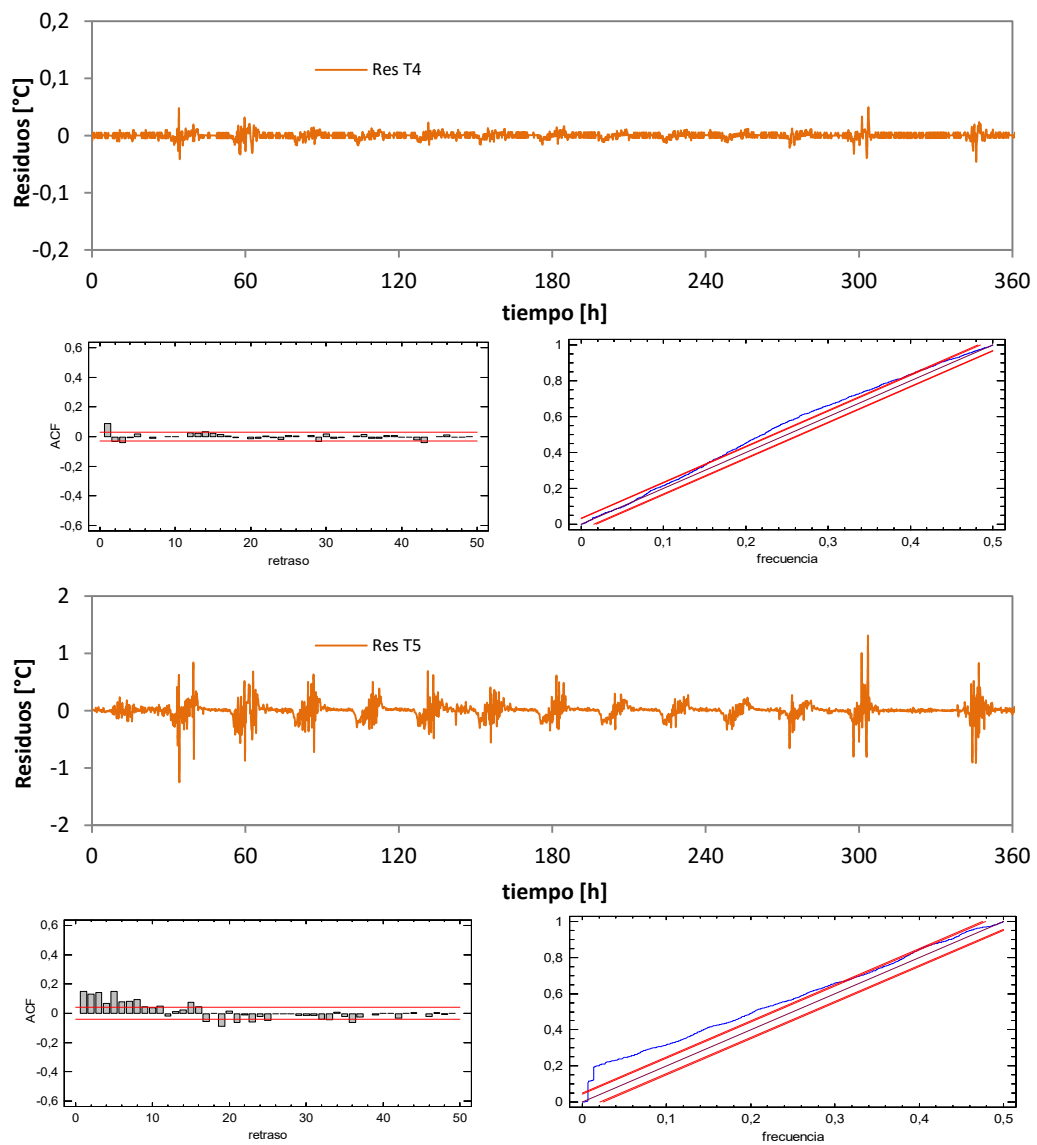


Figura D.32 – Ajuste del modelo completo de fachada ventilada ligera

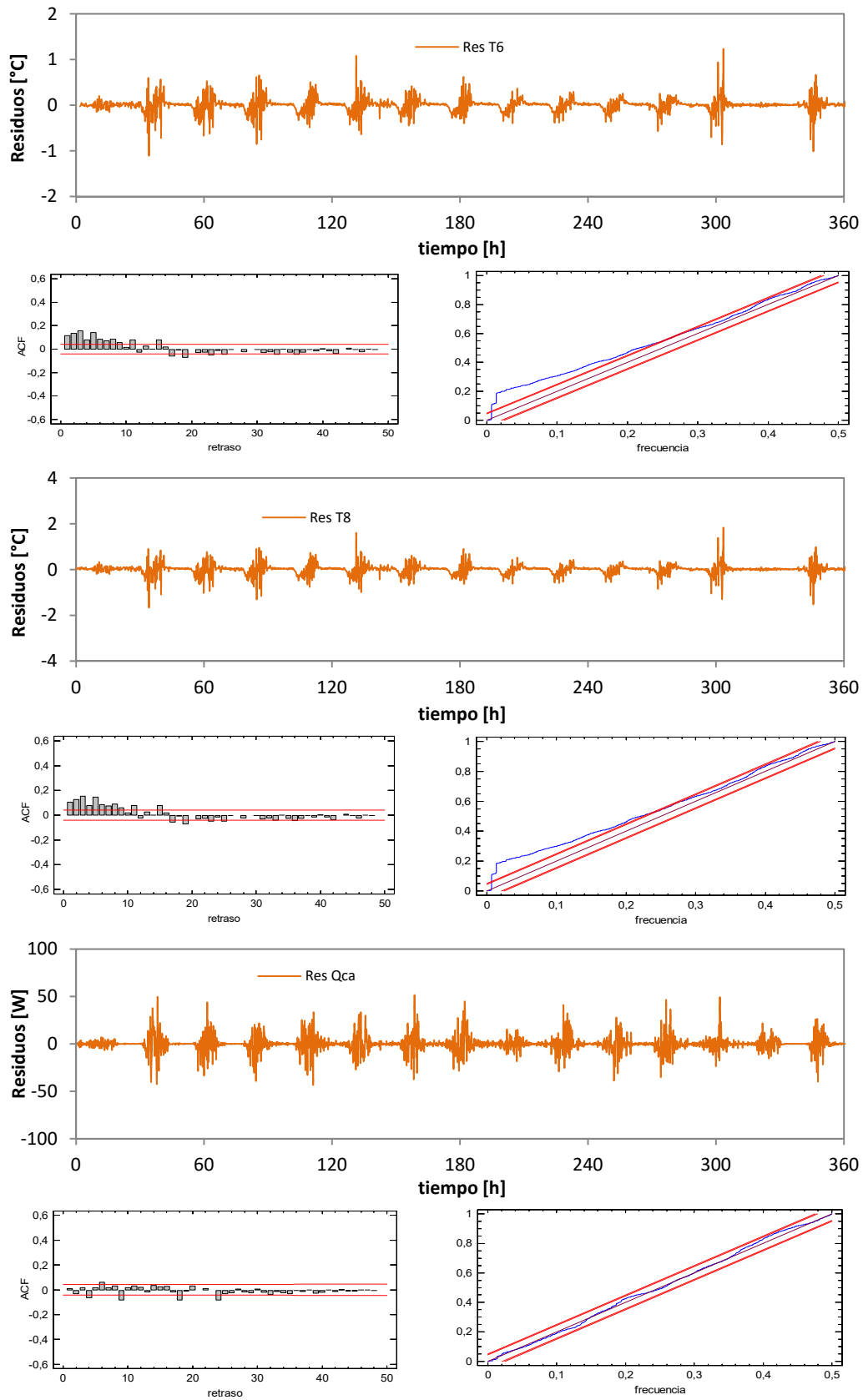


Figura D.33 – Ajuste del modelo completo de fachada ventilada ligera

En la Tabla D.19 se muestran los resultados finales de los parámetros térmicos de la cámara ventilada de la fachada ligera obtenida de los datos del modelo de parámetros concentrados resuelto mediante el proceso de identificación de parámetros.

	<i>parámetro</i>	<i>valor</i>	<i>unidades</i>	<i>u_i [%]</i>
<i>aislante</i>	R_{LR}	1,132	m^2K/W	3,1
	h_{c5}	$1,81+131,46 \cdot v_{ca}$	W/m^2K	13,5
<i>cámara</i>	h_{c6}	$3,92+108,54 \cdot v_{ca}$	W/m^2K	5,7
<i>aire</i>	$P_0(H_{rad56})$	1,077	-	14,4
	$A(Q_{ca})$	1,067	-	5,4
<i>placa</i>	R_{p-c}	0,059	m^2K/W	12,1
<i>cemento</i>	C_{p-c}	0,023	MJ/m^2K	22,3
	h_{ext}	24,52	W/m^2K	9,8
<i>exterior</i>	$A(G_v)$	0,821	-	8,7

Tabla D.19 – Resultados del modelo de parámetros concentrados de la cámara de aire de la fachada ventilada ligera



*Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos*

