



**UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO - EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA**

Caracterización climática, confort  
térmico y reducción de la demanda  
energética en viviendas de tipología  
mayoritaria de la República  
Dominicana mediante paneles  
constructivos más sostenibles y  
aprovechamiento de la ventilación  
natural atendiendo a sus zonas  
climáticas.

Tesis doctoral sustentada por **Jesús Nicolás Peña Suárez**

**Del Programa de Doctorado Eficiencia Energética y Sostenibilidad  
en Ingeniería y Arquitectura del Departamento de Máquinas y  
Motores Térmicos.**

**Directores: Dr. Víctor José del Campo Díaz y Dr. Luis Alfonso del  
Portillo Valdés.**

**2020**

**(cc) 2020 Jesús Nicolás Peña Suárez (cc by-nc 4.0)**

## Índice global

Índice global.....	2
Estructura de esta tesis.....	8
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.....	10
1. Introducción y objetivos.....	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Objetivos.....	13
2. Estado del arte .....	14
3. Sobre la República Dominicana.....	17
3.1. Situación geográfica .....	17
3.2. Socioeconomía.....	18
3.2.1. Producto Interior Bruto (PIB).....	18
3.2.2. Clasificación social conforme a la renta.....	19
3.3. Edificación .....	20
3.3.1. Muros, envolventes, paredes y fachadas.....	21
3.3.2. Techos y cubiertas .....	23
3.3.3. Sistema constructivo .....	26
3.4. Situación energética .....	28
3.4.1. Energía primaria y secundaria .....	28
3.4.2. Energía demandada en 2018.....	28
3.4.3. Consumo de energía por sectores .....	31
3.4.4. Déficit de producción de energía eléctrica .....	33
4. Caracterización climática.....	34
4.1. Introducción .....	34
4.2. Relación clima-energía en la República Dominicana.....	34
4.3. Grados-día .....	35
4.3.1. Metodología de cálculo de los grados-día utilizada para la República Dominicana .....	36
4.3.1.1. Grados-hora promedio diario de calefacción para un periodo de años .....	37
4.3.1.2. Grados-hora promedio diario de refrigeración para un periodo de años .....	38
4.4. Índice de severidad climática .....	39

4.4.1. Método de cálculo de las severidades climáticas.....	41
4.4.1.1. Caso de la severidad climática de invierno (SCI) .....	41
4.4.1.2. Caso de la severidad climática de verano (SCV). .....	42
4.5. Observatorios meteorológicos elegidos y sus variables climáticas más relevantes.....	43
4.6. Resultados del cálculo de los grados-día .....	48
4.7. Resultados de las zonas climáticas.....	54
4.7.1. Zonas climáticas que corresponderían a la R. D. según el Código Técnico de la Edificación (CTE-09).....	54
4.7.2. Propuesta de nomenclatura para las zonas climáticas obtenidas ....	56
<b>5. Bienestar higrotérmico.....</b>	<b>72</b>
5.1. Equilibrio térmico del cuerpo humano .....	72
5.2. Control de la temperatura del cuerpo .....	73
5.3. Ambiente térmico .....	75
5.4. Índices de bienestar térmico .....	79
5.4.1. Temperatura operativa ( <i>t<sub>o</sub></i> ).....	79
5.4.2. Índice PMV y PPD.....	82
5.4.2.1. Disconfort térmico local.....	84
5.4.2.1.1. Porcentaje de insatisfechos por corrientes de aire .....	85
5.4.2.1.2. Porcentaje de insatisfechos por diferencia vertical de temperatura.....	87
5.4.2.1.3. Porcentaje de insatisfechos por asimetría de temperatura de planos radiantes .....	88
5.4.2.1.4. Porcentaje de insatisfechos por suelos calientes y fríos .....	90
5.4.2.1.5. Categorías de ambientes térmicos .....	92
5.4.3. Extensión del Índice PMV a edificios ubicados en climas cálidos .....	92
5.4.3.1. Posibilidad de utilizar el índice PMV en viviendas tipo de la República Dominicana .....	93
<b>6. Conceptos fundamentales para análisis térmicos de los cerramientos .....</b>	<b>98</b>
6.1. Parámetros térmicos: definición y formulación .....	98
6.1.1. Conductividad térmica y coeficiente global de transferencia de calor .....	98
6.1.2. Parámetros que afectan la capacidad de almacenar energía térmica.....	99
6.1.2.1 Densidad ( $\rho$ ).....	99
6.1.2.2. Calor específico ( <i>cp</i> ) .....	99
6.1.2.3. Calor específico volumétrico ( <i>Cv</i> ).....	99

6.1.2.4. Capacidad térmica ( $C$ ).....	100
6.1.3. Parámetros que afectan a la velocidad de transferencia de calor ..	100
6.1.3.1. Difusividad térmica ( $\alpha$ ) .....	100
6.1.3.2. Efusividad térmica ( $b$ ).....	100
6.2. Transmisión de calor por conducción.....	101
6.3. Comportamiento de los cerramientos.....	103
6.3.1. Cerramiento en régimen estacionario .....	103
6.3.2. Cerramiento en régimen dinámico.....	105
6.3.3. Ondas e impedancia térmicas .....	106
6.3.3.1. Elementos ideales de un circuito eléctrico.....	109
6.3.3.1.1. Resistencia .....	109
6.3.3.1.2. Condensador.....	110
6.3.3.1.3. Fuente de tensión .....	110
6.3.3.2. Formas de onda .....	111
6.3.3.2.1. Formas de onda periódica .....	111
6.3.3.2.1.1. Frecuencia de repetición .....	112
6.3.3.2.1.2. La fase.....	112
6.3.3.2.1.3. Valores asociados a las formas de onda periódica.....	112
6.3.3.2.2. Formas de onda senoidales .....	112
6.3.3.3. Aplicación de las leyes de Kirchhoff.....	113
6.3.4. Inercia térmica .....	122
6.3.4.1. Desfase de la onda térmica.....	123
6.3.4.2. Amortiguamiento de la onda térmica .....	125
6.3.4.3. Coeficiente de estabilidad térmica .....	126
6.3.5. Masa útil.....	128
6.3.6. La admitancia térmica .....	129
<b>7. Estudio del comportamiento térmico de los bloques de concretos</b> .....	<b>130</b>
7.1. Introducción .....	130
7.2. Transferencia de calor a través de un muro de bloques de concreto huecos .....	132
7.2.1. Modelo matemático.....	132
7.2.1.1. Hipótesis de partida.....	132
7.2.1.2. Ecuaciones de Laplace .....	133
7.2.1.3. Transferencia de calor por conducción.....	133
7.2.1.4. Transferencia de calor por convección.....	134

7.2.1.5. Transferencia de calor por radiación .....	136
7.3. Análisis numérico en la ingeniería .....	138
7.4. Conducción bidimensional en estado estacionario en diferencias finitas .....	139
7.5. Solución numérica del modelo de transferencia de calor en un bloque de concreto .....	142
7.5.1. Caso de nodos internos .....	142
7.5.2. Caso de frontera adiabática.....	142
7.5.3. Caso de interfase entre dos materiales sólidos.....	144
7.5.4. Caso de interfase sólido-aire .....	145
7.6. Técnica de solución.....	147
7.7. Validación bibliográfica del modelo matemático y el algoritmo numérico .....	148
7.8. Resistencia térmica del muro de bloque de concreto y gradiente térmico .....	148
7.9. Comportamiento térmico del muro de bloques con aislamiento térmico de poliestireno .....	149
<b>8. Ensayos de campo: metodología y resultados.....</b>	<b>152</b>
8.1. Vivienda ensayada.....	152
8.2. Placas aislantes utilizadas.....	155
8.3. Meteorología en los días de ensayo.....	157
8.4. Instrumento de medida utilizado .....	157
8.5. Ensayos realizados .....	158
8.5.1. Sin aislamiento térmico .....	158
8.5.2. Cara interior del paramento aislada térmicamente .....	158
8.5.3. Cara exterior del paramento aislada térmicamente.....	158
8.5.4. Cara exterior e interior del paramento aisladas térmicamente .....	158
8.6. Resultados de los ensayos realizados <i>in situ</i> .....	158
8.6.1. Caso de paramento sin aislar térmicamente (ensayo E1) .....	159
8.6.2. Caso de paramento aislado térmicamente por su cara interior (ensayo E2).....	161
8.6.3. Caso de paramento aislado térmicamente por su cara exterior (ensayo E3).....	163
8.6.4. Caso de paramento aislado térmicamente tanto por su cara interior como exterior (ensayo E4) .....	165
<b>9. Modelo y simulaciones computarizadas .....</b>	<b>167</b>
9.1. Introducción.....	167

9.2.	<i>DesignBuilder</i> .....	167
9.2.1.	Características generales.....	167
9.2.2.	Configuración del modelo utilizado .....	170
9.2.2.1.	Pestaña "Datos" .....	172
9.2.2.2.	Pestaña "Avanzado" .....	173
9.2.2.3.	Pestaña "Diseño de refrigeración" .....	174
9.2.2.4.	Pestaña "Simulación" .....	175
9.2.2.5.	Pestaña "Pantalla" .....	179
9.2.2.6.	Pestaña "Herramientas de dibujo" .....	180
9.3.	Plantillas.....	181
9.3.1.	Plantillas de sitio .....	181
9.3.1.1.	Archivos climáticos .....	182
9.3.1.2.	Año meteorológico típico (TMY).....	183
9.3.2.	Datos del Sitio .....	184
9.3.3.	Materiales .....	185
9.3.3.1.	Placas aislantes.....	185
9.3.3.2.	Suelos y valores de vegetación para cubierta verde .....	186
9.4.	Modelos simulados: aplicación de la metodología .....	188
9.5.	Resultados de los modelos simulados .....	192
9.5.1.	Correspondencia entre el modelo ensayado y simulado .....	192
9.5.1.1.	Caso de pared sin placas térmicamente aislantes como es práctica común .....	192
9.5.1.2.	Pared con placas térmicamente aislantes en su cara interior	196
9.5.1.3.	Pared con placas térmicamente aislantes en su cara exterior	201
9.5.1.4.	Pared con placas térmicamente aislante tanto en la cara interior como exterior .....	206
9.5.2.	Correspondencia entre los datos obtenidos mediante simulación (SRE) y los obtenidos en la investigación de campo (E).....	210
9.5.3.	Simulaciones efectuadas suponiendo nuestra vivienda ubicada en distintas zonas climáticas y con diferentes diseños de construcción .....	211
9.5.3.1.	Simulaciones efectuadas considerando la orientación, muro de cierre del patio trasero y de la casa adosada.....	215
9.5.3.2.	Influencia de la ubicación de las placas aislantes .....	217
9.5.3.3.	Influencia de las infiltraciones .....	219
9.5.3.4.	Influencia del espesor de la placa aislante .....	220
9.5.3.5.	Influencia de la cubierta .....	221
9.5.3.6.	Influencia de las ventanas .....	223

9.5.3.7. Influencia del aprovechamiento de la ventilación natural abriendo las ventanas cuando la temperatura exterior sea inferior a la temperatura en el interior de las viviendas.....	224
9.5.3.8. Comportamiento de la vivienda en otra zona climática .....	230
9.5.3.8.1. Resultados en el caso de una localidad situada en una zona con severidad climática mixta. ....	230
9.5.3.8.2. Resultados en el caso de una localidad situada en una zona con severidad climática SCLiNM durante todo el año. ....	238
9.5.4. Simulaciones referidas al amortiguamiento, desfase y voto medio previsto	250
9.5.4.1. Casos de vivienda pareada .....	250
9.5.4.1.1. Sin aislamiento térmico y con muro de cierre del patio ....	250
9.5.4.1.2. Sin aislamiento térmico y sin muro de cierre del patio .....	251
9.5.4.1.3. Con placas aislantes, cámara de aire y sin muro de cierre del patio .....	252
9.5.4.2. Casos de vivienda no pareada.....	253
9.5.4.2.1. Sin aislamiento térmico y sin muro de cierre del patio .....	253
9.5.4.2.2. Sin aislamiento térmico y con muro de cierre del patio ....	254
9.5.4.3. Caso excepcional en la Rep. Dominicana de vivienda climatizada para mantener su temperatura seca en 26 °C .....	255
9.5.4.4. Voto medio previsto (VMP) .....	256
<b>10. Resumen de conclusiones .....</b>	<b>257</b>
10.1. Futuras líneas de investigación.....	260
<b>11. Referencias.....</b>	<b>261</b>

## Estructura de esta tesis

Esta tesis desarrolla varios temas que se relacionan pero que se analizan y estudian de forma individual para poder obtener los resultados deseados. En cada capítulo se expone la metodología y cálculos realizados correspondientes a cada tema.

**Dedicatoria y agradecimientos:** se hace referencia y mención a las personas e instituciones que se le dedica y agradece.

**Capítulo 1. Introducción y objetivos:** se introduce la investigación, se presenta el porqué, qué se quiere plantear y los objetivos que se quieren alcanzar.

**Capítulo 2. Estado del arte:** aquí se presenta la situación actual del tema, investigaciones relevantes que tratan sobre los temas que se desarrollan en esta tesis.

**Capítulo 3. Sobre la República Dominicana:** en este capítulo se presentan datos y descripciones que ayudan a tener una idea de la situación general del país concerniente a los temas que se desarrollan esta investigación, tales como:

- Situación geográfica del país.
- Socioeconomía dominicana: producto interior bruto (PIB) y la clasificación social conforme a la renta.
- Edificación: se describen los materiales más usados para construcción de muros, envolventes, paredes, fachadas, techos, cubiertas y sistema constructivo.
- Situación energética: una descripción general del sistema energético dominicano, abordando los temas de energía primaria y secundaria, energía demandada, consumo de energía por sectores y el déficit de producción de energía eléctrica.

**Capítulo 4. Caracterización climática:** en este capítulo se explica la metodología utilizada para caracterizar climáticamente el país y dividirlo en zonas climáticas. Se presentan los resultados alcanzados y un análisis de ellos. Se explica la nueva forma que se propone en esta tesis para caracterizar el país dominicano y aquellos países que tienen características climáticas parecidas. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas.

**Capítulo 5. Bienestar higrotérmico:** en este capítulo se explican los términos, conceptos fundamentales, metodología y ecuaciones de cálculos relacionados al tema del bienestar higrotérmico desarrollado en esta investigación. Se explica la extensión del método Fanger para climas cálidos, cuyos resultados para la Rep. Dominicana se analizan en el capítulo 9.

**Capítulo 6. Conceptos fundamentales para análisis térmicos de los cerramientos:** en este capítulo se presentan los términos, conceptos, metodología y ecuaciones de cálculos para el análisis térmico que se trata en esta tesis. Los resultados derivados de este capítulo se analizan en el capítulo 9.

**Capítulo 7. Estudio del comportamiento térmico de los bloques de concretos:** en este capítulo se explica un modelo matemático utilizado para



estudiar el comportamiento térmico de los bloques de concreto hueco utilizados en las viviendas ensayadas y simuladas en esta tesis. Se presentan los resultados obtenidos al aplicar este método.

**Capítulo 8. Ensayos de campo:** en este capítulo se describe la metodología utilizada para realizar los ensayos de campos de esta tesis, se describe la vivienda ensayada, los materiales e instrumentos utilizados. Se analizan los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados.

**Capítulo 9. Modelo y simulaciones computarizadas:** este es el capítulo más largo. Se explica la metodología utilizada para realizar las diferentes simulaciones. Se describe el programa informático y la configuración del modelo utilizado para realizar las simulaciones desarrolladas en esta tesis. Se explica la elaboración de las diferentes plantillas creadas para la Rep. Dominicana. Se describen los modelos simulados. Se presentan y analizan los resultados de los diferentes modelos simulados comparándolos con los resultados de los ensayos de campo y se establece la correspondencia entre ellos. Finalmente se tomó el modelo y se realizaron diferentes simulaciones para evaluar el comportamiento termoenergético de la vivienda tomando en cuenta diferentes situaciones y diseños, como por ejemplo: la orientación geográfica, el lugar de colocación de las placas aislantes y una propuesta de mejora a dichas placas aislantes, el control de la infiltración, el aprovechamiento de la ventilación natural, comparación de tres tipos de cubiertas, cambio de zonas climáticas. En este capítulo junto con el análisis de los resultados de cada simulación se detallan las conclusiones de cada situación simulada.

**Capítulo 10. Resumen de conclusiones:** ya que en cada capítulo se presentan las conclusiones alcanzadas, en este capítulo se presenta un resumen de las principales conclusiones obtenidas en esta tesis.

**Capítulo 11. Referencias bibliográficas:** En este capítulo se presentan las diferentes fuentes bibliográficas mencionadas en esta tesis.

## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Soy creyente en la existencia de Dios, por lo que en primer lugar dedico y doy gracias a Dios por permitirme llevar a feliz término esta tesis.

Agradezco y dedico esta tesis a mi madre Lucía Suárez Felipe. También a mi otra madre Juana Suárez Felipe. Son para mí fuente de motivación, ánimo y ayuda para siempre seguir adelante. Yo ponía el cerebro y el cuerpo físico, pero ellas me ponían la motivación y fuente de inspiración. Sé que este logro le llena de orgullo y alegría.

No puedo dejar de mencionar a mi tutor y director de tesis, mi profesor el Dr. Víctor del Campo Díaz por su gran dedicación, ayuda y paciencia conmigo, sin dudas una persona de vital importancia en este logro, no solo en lo académico sino en lo emocional y fraterno ¡Nos hicimos amigos! Agradezco a mi codirector de tesis, mi profesor el Dr. Luis Alfonso del Portillo Valdés.

También se la dedico a mi familia, principalmente a aquellas personas que daban seguimiento a mi trayectoria preocupándose por mí de forma activa y directa: Aury Elizabeth Peña Suárez (hermana), Fermina Suárez (tía), Eliezer Peña Suárez (hermano), Remigio Suárez (tío Negro), Ofelia Díaz, Roberto Suárez (tío), Yisela Suárez (prima), Jesús Juniol Suárez (hermano), Eusebio Peña (mi padre biológico). Sé que esto es fuente de alegría y orgullo para todos.

No puede faltar una dedicatoria y agradecimientos para mis amigos, resaltando a aquellos que desde aún desde la distancia geográfica era como si estaban aquí "estudiando conmigo" ya que me preguntaban sobre "cómo iba con el doctorado", se preocuparon por saber de mi avance y bienestar, pero también amigos de Bilbao: Miriam de Castro, Pablo Peña y Eluvina Pérez (mis otros "padres"), Jatna Sánchez, Roalquis Sierra, Marialba Gómez, Charly Tolentino, Roberto del Valle, Andrés Guzmán, Hansel de León, Scarlin Tavarez, Sadiet Regalado, Ana Asencio, Adelsi de Jesús, Humberto Heredia, Ada González, Franklin del Valle, Paola Ogando, Raydy Cabrera, Harold Wilson, Emilio Lugo, Julia Franco Duarte (mi "madre" en San Pedro de Macorís), Rubén Ramos, Rubén Fernández, Rubén Martorell, Dan Malaxetxebarria, Enrique Musatadi, Mitchel Cordero, Eunice Calvo, el pastor Ranieri Sales y su esposa Mara.

Una dedicatoria y agradecimiento especial para:

- Alexander Ramos, director de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Central del Este (UCE), quien me incluyó en el listado de profesores de la Universidad recomendados al Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología (Mescyt) para realizar estudios de postgrado en el extranjero.
- Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología de la República Dominicana (Mescyt) por financiar esta investigación científica y proceso de formación.
- Andrea Paulino, por ayudarme a tomar la decisión de continuar con el doctorado en el 2015 y siempre darme seguimiento.
- El pastor Alexis García y su esposa Maritza Sandoval, Samuel Fernández, Joselin Vargas, Beverling García, Traicho Mihaylov amigos cuya compañía fue de gran estímulo y apoyo. En esos momentos críticos, cuando el Ministerio se atrasaba con los pagos, ellos no me desamparaban.

- Osiris Abad y Jennifer Estrella, ellos pusieron a disposición una vivienda en la cual se realizó un monitoreo de parámetros térmicos y mediciones *in situ*.
- Iván Moronta Tremols, Nancy Jiménez, Betel Castillo, Israel Colomé, Eliana de Jesús, Nelly Almonte, amigos míos que en una etapa importante del proceso fueron de mucha ayuda, estímulo y ánimo.
- Gonzalo Diarce, por llevar a cabo en el laboratorio de ciencia de los materiales la determinación del calor específico de las placas aislantes utilizadas en esta tesis.
- Carlos Cáfaró, por llevar a cabo en el laboratorio de edificación la determinación de la conductividad térmica de las placas aislantes utilizadas en esta tesis.
- Dulce Gómez, porque cuando no recibíamos a tiempo la manutención, ella era una persona muy considerada y condescendiente con nosotros los becados dominicanos en cuanto a nuestra estadía en su piso.
- Nadege Kontchie Timen, esta persona siempre se preocupó por mí y en los últimos dos años cuidó como una madre cuida de un hijo.
- A los expertos revisores por dedicar parte de su tiempo y pericia para evaluar esta tesis y dar su visto bueno como señal de que esta tesis doctoral es digna de ser presentada y defendida ante un tribunal de la comunidad científica, ellos son: dos doctoras internacionales, la Dra. Gilkauris Rojas y la Dra. Yokasta García Frómeta, y un doctor interno al programa de doctorado, el Dr. Aitor Erkoreka.

Una dedicación especial para mi sector donde crecí y vivo en la República Dominicana: Los Alcarrizos (Obras Públicas). Al igual que para mi localidad de origen Maimón-“Bonaó”. El primero, un barrio de las inmediaciones de la capital dominicana estigmatizado por la pobreza y delincuencia; el segundo es considerado un “campo de un país tercermundista”. Esto lo hago como símbolo de estímulo, alegría, paradigma y constancia de que mi barrio y mi campo también producen recursos humanos de alto nivel académico e intelectual superando las exigentes pruebas de un país desarrollado. ¡Tu lugar de origen no determina tu lugar final!

¡Esta tesis doctoral es de todos, por todos y para todos! Ánimo, firme y adelante que Dios está de nuestro lado.

Termino con las palabras que termina Napier en uno de sus libros:

“Que quien recoja el fruto de este pequeño trabajo, pague tributo de gloria y agradecimiento a Dios, autor soberano y dispensador de todos los bienes.”

# 1. Introducción y objetivos

## 1.1. Introducción

¿Te has preguntado qué haríamos sin energía? creo que es una pregunta que puede generar diferentes respuestas. El tema energético cada día toma más y más relevancia, como también cada día aumenta el consumo de energía. Creo que nadie pone en duda la importancia de la energía, pero el consumo energético debe ser sostenible. Esta tesis doctoral se enfoca en la sostenibilidad y eficiencia energética en la edificación de la República Dominicana.

Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y la Agencia Internacional de la Energía (AIE) los edificios y el sector de construcción de edificios combinados son responsables del 30 % al 36 % del consumo global de energía final y de casi el 40 % del total de las emisiones directas e indirectas de CO<sub>2</sub> (1) (2).

La República Dominicana (R. D.) está localizada en la zona tropical caribeña, alta radiación solar con un clima considerado cálido y húmedo (3), PIB corriente 80 940 millones de dólares estadounidenses, PIB corriente per cápita 7880,55 dólares estadounidenses, PIB corriente per cápita (paridad de poder adquisitivo, PPA) 18 424,61 dólares internacionales per cápita (4) (5) (6); el sector residencial representa el 23,5 % del consumo total de energía final (7); las casas independientes son el tipo de vivienda que predominan con un 77,66 % (8), de las cuales el 74,5 % está construida con bloques de hormigón en las paredes (8) y 40,8 % construida con concreto en el techo (8). En consecuencia, esta tesis pone de manifiesto que partiendo de la realidad socioeconómica dominicana es factible reducir el consumo de energía eléctrica de las viviendas objeto de nuestro interés. Además, esta reducción no va acompañada de un aumento del discomfort térmico, sino que es factible mantener la temperatura seca interior por debajo de los 26 °C.

Para esta investigación se realizaron ensayos de campo y simulaciones con el programa informático *DesignBuilder*, pero antes se procedió en base a datos del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos de América (NREL por sus siglas en inglés) y de las estaciones meteorológicas de la Oficina Nacional de Meteorología Dominicana (ONAMET) a caracterizar el país en zonas climáticas según su severidad, ya que no se dispone de dicha caracterización.

La investigación de campo se realizó en una vivienda dominicana cedida para tal fin. A tenor, de ser un país deficitario en materias primas se desechó ensayar con materiales que deberían importarse, lo que tendría como efecto aumento en el costo económico, además de aumentar la dependencia de la República Dominicana de proveedores externos. Asimismo, se focalizó la atención en materiales que no fuesen derivados del petróleo y que en la medida de lo posible pudieran obtenerse total o parcialmente de materiales de desecho.

Los resultados obtenidos de la investigación de campo resultaron satisfactorios y avalaban la idoneidad de efectuar simulaciones atendiendo a las zonas climáticas, la orientación cardinal de la vivienda, la influencia de la infiltración, la ventilación natural y otros aspectos.

Esta investigación resulta pertinente porque cubre un vacío técnico que hasta ahora no estaba disponible: una caracterización de la severidad climática del territorio dominicano necesaria para abordar temas de eficiencia energética en la edificación, a su vez se propone una forma de caracterización climática que puede ser aplicada en países con características climáticas parecidas. Además de esto se presenta un diseño constructivo idóneo para cada zona climática establecida combinado con la ventilación natural hasta llegar a prescindir de equipos de climatización para mantener el confort térmico.

Las conclusiones obtenidas permiten afirmar que se produce una mitigación de los efectos de la insolación en viviendas lo que conlleva a una reducción de las cargas térmicas hacia el interior, en consecuencia, se reduce la temperatura de bulbo seco en el interior de la vivienda lo que se traduce en menor consumo de energía para mantener el confort térmico.

Para esta tesis se parte de la hipótesis principal de aprovechar el desfase y amortiguamiento de la onda térmica que proporcionan los materiales para que el pico de los efectos de la radiación solar y temperatura máxima exterior se sienta en el interior de la vivienda de forma amortiguada y en horas en la cual se pueda aprovechar la ventilación natural.

## 1.2. Objetivos

En este apartado se procede a mencionar los objetivos principales de esta tesis:

- Objetivo general:

Presentar un estudio que sirva como base científica para que la República Dominicana pueda utilizar en la implementación de políticas destinadas a mejorar la ventilación, el confort térmico y la climatización en edificios, con tecnologías constructivas basadas en la sostenibilidad que puedan ser usadas por la mayoría de la población.

- Objetivos específicos:

- Caracterizar climáticamente las diversas regiones del país conforme a los criterios de severidad climática, estableciendo las diferentes zonas climáticas.
- Presentar mejoras constructivas para cada zona climática utilizando materiales más sostenibles, de bajo coste y con recursos locales que se pueden utilizar para reducir las cargas térmicas de las viviendas y mantener el confort térmico.
- Determinar qué tan factible es aprovechar la ventilación natural en las diferentes zonas climáticas para mantener condiciones de confort prescindiendo de equipos de climatización.
- Aplicar la extensión del método Fanger para climas cálidos.
- Establecer cuál es la posición adecuada de la capa aislante.
- Constatar cómo influye la posición y las propiedades térmicas de los materiales para mantener el confort térmico y reducir el consumo de energía en climatización.
- Elaborar plantillas con datos propios dominicanos para ser usados en programas informáticos de simulación energética.

## 2. Estado del arte

Por su ubicación geográfica la República Dominicana está localizada en el Caribe, pertenece a la denominada zona tropical que se caracteriza por tener climas cálidos, húmedos y alta radiación solar. Actualmente el país no dispone de normativa alguna referida a la Calidad Ambiental Interior. Esto mismo sucede en relación con la eficiencia energética en la edificación. A ello, se añade la ausencia de cualquier caracterización climática de las diversas regiones del país conforme a su severidad climática, lo que imposibilita la normalización del cálculo de las cargas térmicas debidas a factores climáticos y en consecuencia el establecimiento de medidas de sostenibilidad en la edificación.

La forma que se construye según la Oficina Nacional de Estadística Dominicana (ONE) en la mayoría de las viviendas consiste en muros de bloques de hormigón con cubiertas de zinc o con losa de hormigón (8). Un estudio realizado en Cuba, país en el cual es común la misma forma de construir y que también se encuentra en el Caribe, cuestiona la idoneidad de esta forma de construir para mantener condiciones de confort en la vivienda en las condiciones del clima cálido-húmedo del Caribe (9).

El consumo de energía es un tema de interés internacional del cual el sector de la edificación juega un papel preponderante por ser uno de los sectores que más consumen. Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y la Agencia Internacional de la Energía (AIE) los edificios y el sector de construcción de edificios combinados son responsables del 30 % al 36 % del consumo global de energía (1) (2). Según datos de la Comisión Nacional de Energía Dominicana (CNE) el sector residencial representa el 23,5 % del consumo total de energía final (7).

Otro detalle a tomar en cuenta es que según la Comisión Nacional de Energía Dominicana (CNE) la energía eléctrica se genera principalmente con plantas de generación antigua que utilizan petróleo y derivados, pero el país tiene que importar, esto produce encarecimiento de la factura eléctrica (7) (10) (11).

En cuanto al estudio del clima y su relación con el consumo energético los diseñadores de edificios suelen estar interesados en aquellas variables climáticas que afectan el confort térmico y la transferencia de calor a través de los muros de los edificios y la ventilación. Los datos climáticos cruciales para los diseños de edificios y su análisis energético incluyen temperatura (bulbo seco y bulbo húmedo), humedad relativa, radiación solar (global, directa y difusa) y condiciones del viento (velocidad y dirección) (12) (13).

En países con ubicación geográfica en la zona tropical como Tailandia se realizó una caracterización climática para fines de climatización basada en la humedad relativa y temperatura del aire exterior (14). En su Estándar 169 de ASHRAE los Estados Unidos de América que también tienen territorio en zona tropical como Hawái, Islas Vírgenes de los Estados Unidos (en el Caribe cerca de Puerto Rico), y Puerto Rico (vecino al territorio dominicano) utiliza los grados-día como base para su caracterización climática y sus divisiones de zonas climáticas (15). Al igual que las Islas Vírgenes Británicas ubicadas en el Caribe cerca de Puerto Rico y por ser parte de Reino Unido utilizan los grados-día para su caracterización

climática (16). En Cuba también utilizan los grados-día en el estudio del clima y su relación con el consumo de energía (17) (18).

De la mano con una caracterización climática, es preciso conocer cuál es el rango de temperatura a la cual las personas sienten confort. El conocimiento de este rango permite establecer temperaturas de consigna para controlar el funcionamiento de los equipos de climatización y de esa forma controlar el consumo energético. ASHRAE en su método de "Zona de Confort Gráfico" establece el rango de confort térmico, incluyendo invierno y verano, entre 19,7 °C y 28,2 °C con base a ocupantes representativos con tasa metabólica entre 1 y 1,3 met, aislamiento de ropa entre 0,5 y 1 clo, no expuestos a radiación solar directa, con velocidad media del aire menor que 0,2 m/s, con una relación de humedad de 0,012 kg · H<sub>2</sub>O / kg de aire seco o inferior (19). En España el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) limita a 26 °C la temperatura para verano y 21 °C para invierno como temperaturas para mantener en el interior, con humedad relativa entre el 30 % y 70 % (20). En Cuba estudios realizados concluyeron con rango de confort entre 24,7 °C y 30,7 °C (21) (22). En Tailandia la temperatura de consigna establecida para equipos de climatización es 26 °C (23). En Malasia el rango de confort térmico varía 23,6 °C-31 °C, humedad 40 %-60 % y velocidad del aire 0,3 m/s-0,5 m/s (24). En Indonesia estudios muestran rango de temperatura de confort entre 26,4 °C y 29,9 °C (25) (26). Otros estudios realizados sobre confort térmico tomando en cuenta diferentes zonas climáticas se encuentran en este estudio "*Field studies on human thermal comfort - An overview*" en el cual establece para climas tropicales húmedos zonas de confort entre 22 °C y 32,5 °C para edificios que funcionan libremente y 22 °C-28 °C para edificios acondicionados mecánicamente (27).

Una herramienta que ha ganado popularidad en cuanto al estudio e investigación sobre confort, comportamiento térmico y energético en viviendas es la utilización de *software* de simulación energética. En Brasil utilizaron el *software EnergyPlus* para evaluar el confort y rendimiento térmico de viviendas sociales más allá de sus ocho zonas bioclimáticas (28). En Malasia utilizaron el *software* Autodesk Ecotect para examinar el confort térmico de viviendas residenciales en diferentes microclimas (24) (29). En México utilizaron *EnergyPlus* para identificar diseño bioclimático de una casa con técnicas pasivas y soluciones de construcción adaptable a viviendas para personas de bajos ingresos para ampliar el periodo de confort térmico (30). En una investigación aplicada en Haití (país vecino de la Rep. Dominicana) utilizaron el *software EnergyPlus* para simular técnicas de enfriamiento pasivo y aplicado para optimizar las condiciones interiores en viviendas de bajo costo (31). En China diversos estudios con base en simulación del *software DesignBuilder* examinaron propuestas de metodología para analizar en viviendas los efectos combinados de techo verde, paredes aisladas y ventilación nocturna (32) (33) (34). En un estudio en una ciudad tropical de la India el objetivo fue explorar soluciones alternativas a la dependencia total de aire acondicionado (A / C) del edificio residencial, probando a través de la simulación con *EnergyPlus* el efecto de las intervenciones de bajo costo y técnicamente simples sobre la comodidad y el consumo de energía (35).

Por lo tanto, podemos concluir que la caracterización climática y la forma de construir son factores esenciales que se deben tomar en cuenta para analizar propuestas de eficiencia energética en la edificación y que los programas informáticos de simulación energética son de ayuda para realizar trabajos de investigación en dicha área.



### 3. Sobre la República Dominicana

#### 3.1. Situación geográfica

La isla del Caribe denominada por los aborígenes como Quisqueya fue llamada por los castellanos como la Hispaniola (8). Forma parte de las Antillas Mayores, siendo la segunda en extensión territorial después de Cuba. Sobre la Hispaniola se asientan dos estados independientes: la República Dominicana y la República de Haití. Los 48 511,44 Km<sup>2</sup> del territorio dominicano se extiende por aproximadamente 2/3 de la superficie isleña ocupando su zona oriental (8) (36).

La República Dominicana (R. D.) se sitúa entre los paralelos 17 grados 40 minutos y 19 grados 56 minutos latitud norte. Quedando la totalidad de la isla al sur del trópico de Cáncer, que limita por el norte la Zona Ecuatorial, pasa al norte de nuestro país (8) (36). Esta situación condiciona su climatología tropical. En cuanto a sus coordenadas longitudinales se extiende entre los paralelos 68 grados 20 minutos y 72 grados y 01 minuto, longitud oeste medida a partir del meridiano de Greenwich. Limita al norte con el océano Atlántico que la separa de las islas Caicos y Turcas; al este con el canal de La Mona que la separa de Puerto Rico; al sur con el mar Caribe o de las Antillas; y al oeste limita con la República de Haití (8) (36). En los mapas de las figuras siguiente se muestran su ubicación geográfica.

Figura 1. Ubicación geográfica de la República Dominicana.

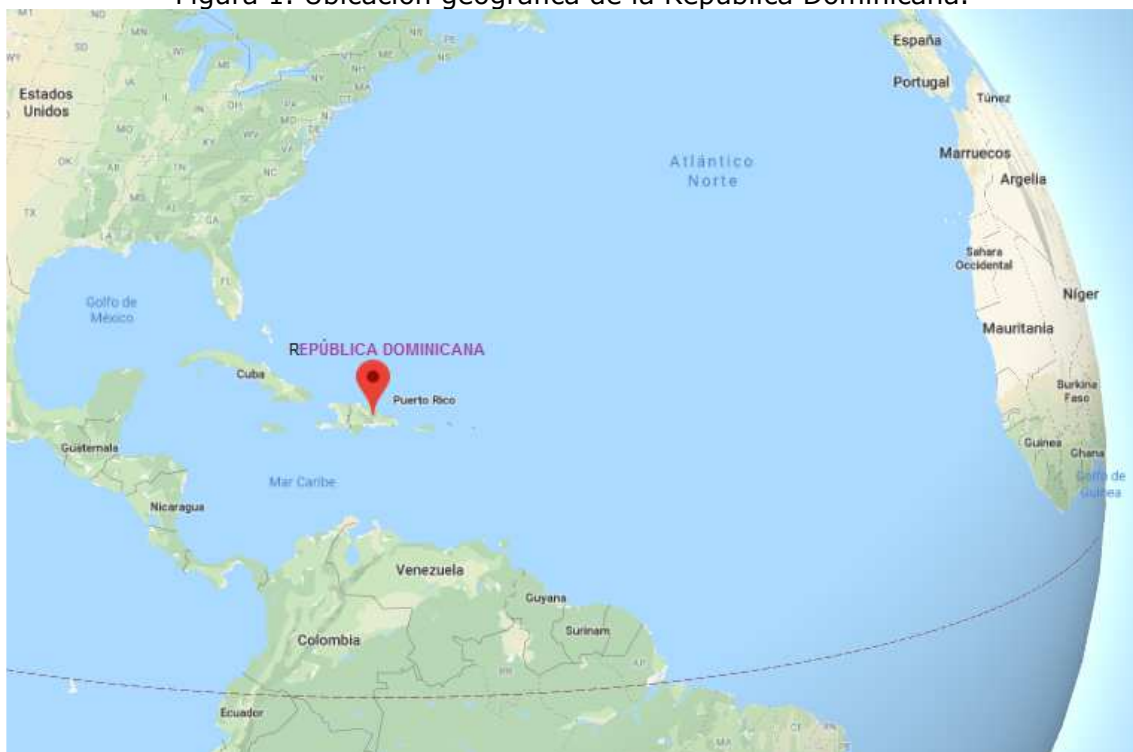


Figura 2. Trópico de Cáncer y la República Dominicana.



## 3.2. Socioeconomía

### 3.2.1. Producto Interior Bruto (PIB)

El producto interior bruto corriente (PIB Corriente) de la República Dominicana, según el Banco Central de la República Dominicana (BCRD), fue en el 2018 de 81 282,6 millones de dólares estadounidenses, mientras el PIB Corriente per cápita alcanzó los 7917,5 dólares estadounidenses (6). La tabla 1 muestra los valores del PIB desde 2010 hasta 2018 en moneda dominicana y en dólares estadounidenses según el BCRD, la tabla 2 muestra los datos del periodo 2017-2018 según el Fondo Monetario Internacional (FMI).

Tabla 1. Producto interior bruto de la República Dominicana 2010-2018.

Fuente: elaboración propia con datos del BCRD.

<b>Banco Central de la República Dominicana (BCRD)</b>					
<b>Departamento de Cuentas Nacionales y Estadísticas Económicas</b>					
<b>PRODUCTO INTERIOR BRUTO (PIB)</b>					
<b>2010-2018</b>					
<b>Período</b>	<b>Población</b>	<b>PIB Corriente</b>	<b>PIB Corriente</b>	<b>PIB Corriente</b>	<b>PIB Corriente</b>
	(Miles)	(Millones de RD\$)	(Per cápita en RD\$)	(Millones de US\$)	(Per cápita en US\$)
2010	9479	1 983 201,7	209 229,1	53 889,6	5685,4
2011	9580	2 210 213,9	230 707,9	58 074,6	6062,0
2012	9681	2 386 016,2	246 464,8	60 739,9	6274,2
2013	9785	2 619 769,7	267 742,0	62 724,3	6410,5
2014	9883	2 877 527,8	291 145,0	66 150,9	6693,1
2015	9980	3 099 651,2	310 578,7	68 889,6	6902,6
2016	10 075	3 333 419,3	330 859,0	72 418,4	7187,9
2017	10 169	3 613 147,1	355 304,0	76 038,1	7477,3
2018	10 266	4 025 092,4	392 074,2	81 282,6	7917,5

Tabla 2. Producto interior bruto (PIB) de la República Dominicana 2017-2018 según el FMI.

Fuente: elaboración propia con datos del FMI.

<b>Fondo Monetario Internacional (FMI)</b>							
<b>Base de datos de perspectivas económicas mundiales</b>							
<b>PRODUCTO INTERIOR BRUTO (PIB) 2017-2018</b>							
Período	Población (Miles)	PIB Corriente (Millones de RD\$)	PIB Corriente (Per cápita en RD\$)	PIB Corriente (Millones de US\$)	PIB Corriente (Per cápita en US\$)	PIB Corriente (Paridad de poder adquisitivo [PPA]; millones dólares internacionales)	PIB Corriente (Per cápita Paridad de poder adquisitivo [PPA]; dólares internacionales)
2017	10 169	3 613 150,0	355 303,97	76 091	7482,49	172 957	17 007,98
2018	10 271	4 003 870,0	389 828,03	80 940	7880,55	189 237	18 424,61

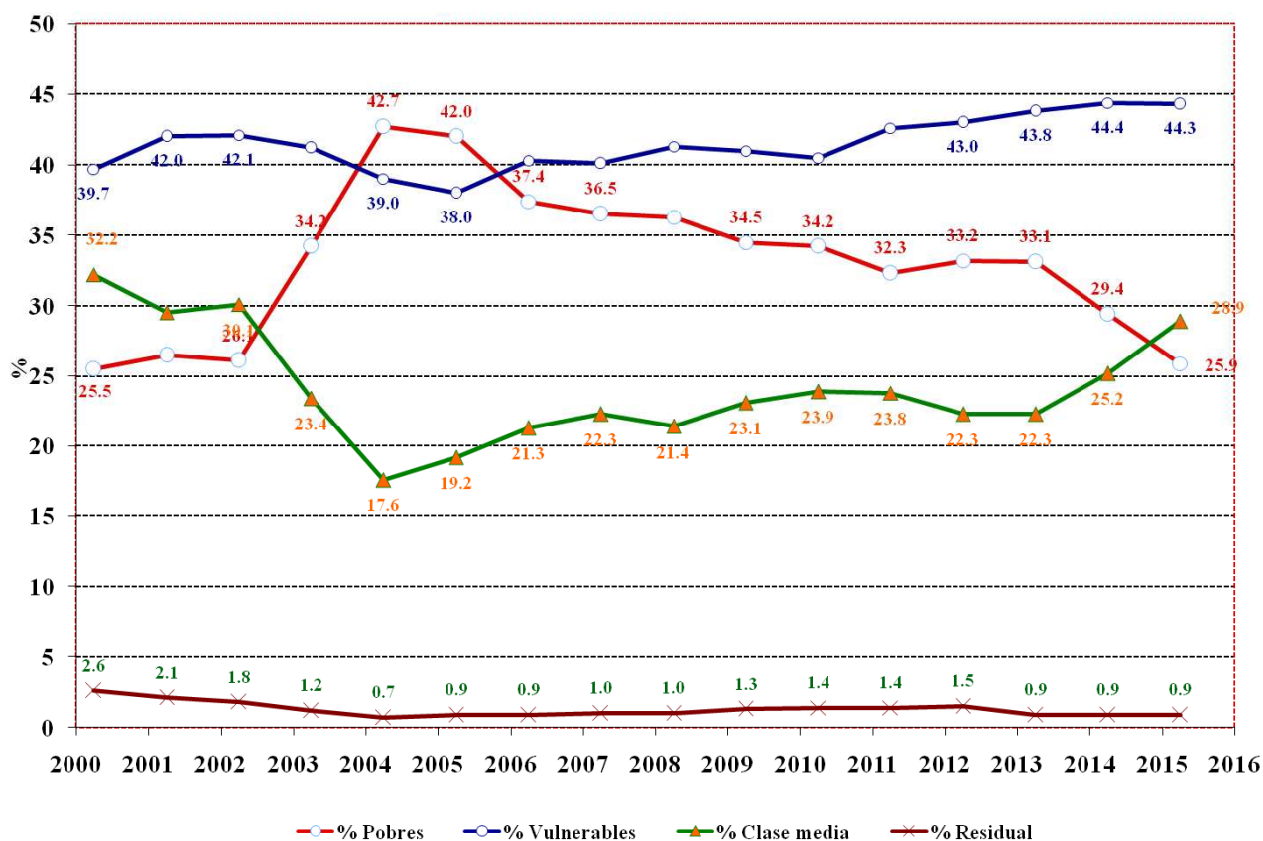
### 3.2.2. Clasificación social conforme a la renta

El Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo de la República Dominicana utilizando definiciones del Banco Mundial (BM) y del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) divide la población en 4 grupos (37) (38):

1. Pobres: hogares con ingreso per cápita inferior a 4 dólares estadounidenses (USD) por día al tipo de cambio de la Paridad del Poder Adquisitivo (PPA o PPP por sus siglas en inglés de *Purchasing Power Parity*).
2. Vulnerables (casi pobres, clase media-baja): hogares con ingreso per cápita de 4,0 USD–10,0 USD por día al tipo de cambio PPA.
3. Clase media: hogares con ingresos per cápita de 10 USD–50 USD por día al tipo de cambio PPA.
4. Ricos (la élite, residual): hogares con ingreso per cápita por encima de 50 USD por día al tipo de cambio PPA.

El gráfico 1 muestra los porcentajes de la población por estratos sociales desde el año 2000 hasta el 2015 según la definición del Banco Mundial-Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (BM-PNUD) que fue utilizada por el gobierno dominicano.

Gráfico 1. Porcentaje de población por estratos sociales según el BM-PNUD 200-2015. Fuente: Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo de la República Dominicana.



### 3.3. Edificación

En la República Dominicana los materiales de construcción principalmente utilizados son: madera (varas, tablas de palma, tablas rústicas o madera industrializada), bloques de hormigón vibrado, cemento, láminas de zinc, aluminio, hormigón armado, vidrio (8) (39).

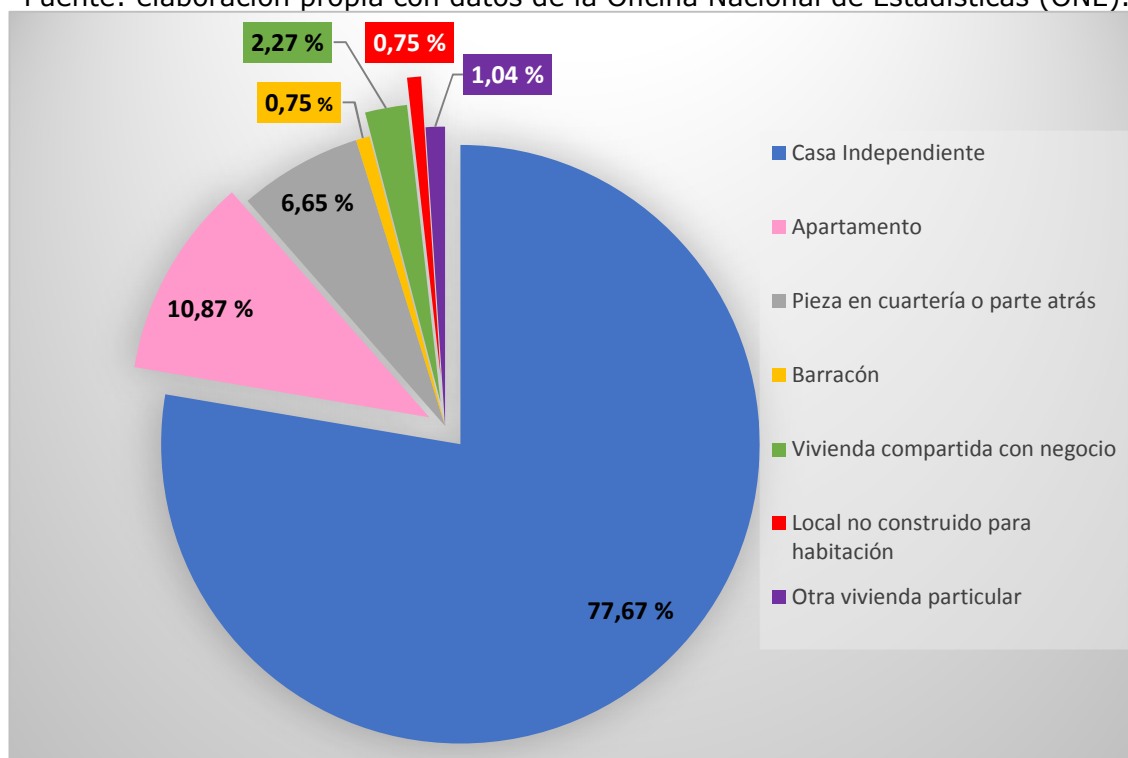
El mayor porcentaje de las viviendas son del tipo unifamiliar (independiente) (8) (39), construidas principalmente de una o dos plantas (niveles). De estas viviendas las hay aisladas, que son aquellas que no están en contacto físico con otras, sino que le circunda un patio delimitado por un muro de bloques de hormigón construido hasta cierta altura que le da privacidad, seguridad e independencia. También están las viviendas que tienen otra adosada o apareada a la misma, suelen tener patios delimitados por muros de bloques de hormigón. En los patios se suele tener árboles de diferentes alturas. Además, entre los tipos de viviendas se pueden encontrar complejos de apartamentos. La tabla 3 muestra las cantidades totales según los tipos de viviendas (8).

Tabla 3. Número de viviendas, por tipo de vivienda.  
Fuente: elaboración propia con datos de la Oficina Nacional de Estadísticas (ONE).

Tipo de vivienda	Cantidad
<b>Casa Independiente</b>	2 385 779
<b>Apartamento</b>	333 971
<b>Pieza en cuartería o parte atrás</b>	204 396
<b>Barracón</b>	22 915
<b>Vivienda compartida con negocio</b>	69 670
<b>Local no construido para habitación</b>	23 153
<b>Otra vivienda particular</b>	31 852
<b>Total</b>	3 071 736

El gráfico siguiente muestra los porcentajes según los tipos de viviendas.

Gráfico 2. Porcentaje de viviendas, por tipo de vivienda.  
Fuente: elaboración propia con datos de la Oficina Nacional de Estadísticas (ONE).



### 3.3.1. Muros, envoltentes, paredes y fachadas

En las paredes y fachadas (tabla 4 y gráfico 3), los materiales de construcción comúnmente utilizados son: el bloque de hormigón vibrado, la madera, la tabla de palma, el tejamanil, la yagua (ver figura 3).

En la República Dominicana el tejamanil es un término utilizado para referirse a la técnica constructiva del bahareque, consiste en construir los cerramientos con horcones o cañas dispuestas verticalmente, enterradas en el suelo, entrelazadas horizontalmente con listones de madera y recubiertas con un embarado formado por tierra, yeso o barro, para darle mayor resistencia (ver figura 4).

La yagua es el nombre dado en diversos países de Hispanoamérica a distintas palmeras de las cuales se obtienen fibras textiles. En otros países se le denomina de esta manera a la vaina de tejido fibroso que rodea la parte más alta y tierna de ciertas palmas.

Figura 3. Yagua.



Figura 4. Tejamanil.



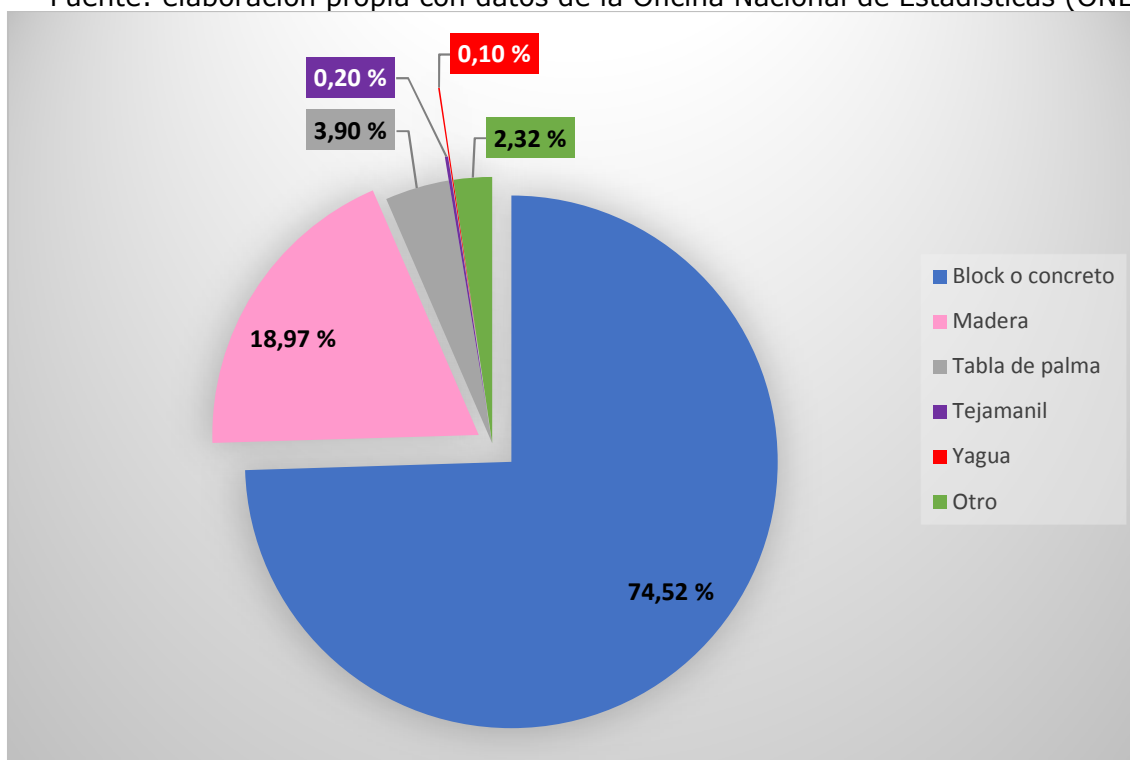
Tabla 4. Cantidad de viviendas ocupadas por material de construcción predominante en las paredes.

Fuente: elaboración propia con datos de la Oficina Nacional de Estadísticas (ONE).

<b>Número de viviendas por materiales en muros exteriores</b>	
<b>Block o concreto</b>	1 984 239
<b>Madera</b>	505 159
<b>Tabla de palma</b>	103 722
<b>Tejamanil</b>	5 440
<b>Yagua</b>	2 603
<b>Otro</b>	61 699
<b>Total</b>	2 662 862

Gráfico 3. Porcentaje de viviendas según el material de construcción predominante en sus paredes.

Fuente: elaboración propia con datos de la Oficina Nacional de Estadísticas (ONE).



### 3.3.2. Techos y cubiertas

En los techos o cubiertas los materiales generalmente utilizados son: el hormigón, las láminas de zinc, el asbesto-cemento, la cana y la yagua de palma. No obstante, el hormigón y las láminas de zinc (figura 5) son los materiales más utilizados en techos o cubiertas con el 98,31 % de los casos (8) (39).

Figura 5. Láminas de zinc.



En las imágenes siguientes se pueden ver algunas viviendas con algunos de los materiales descritos anteriormente.

Figura 6. Vivienda con muros de madera y techo en cana.  
Fuente: Ricardo Briones.





Figura 7. Vivienda con muros de madera y techo de zinc.



Figura 8. Vivienda con muros de bloques de hormigón vibrado enlucido con mortero y techo de zinc.



Figura 9. Vivienda con muros de bloques de hormigón vibrado enlucido con mortero y cubierta de tejas con hormigón.



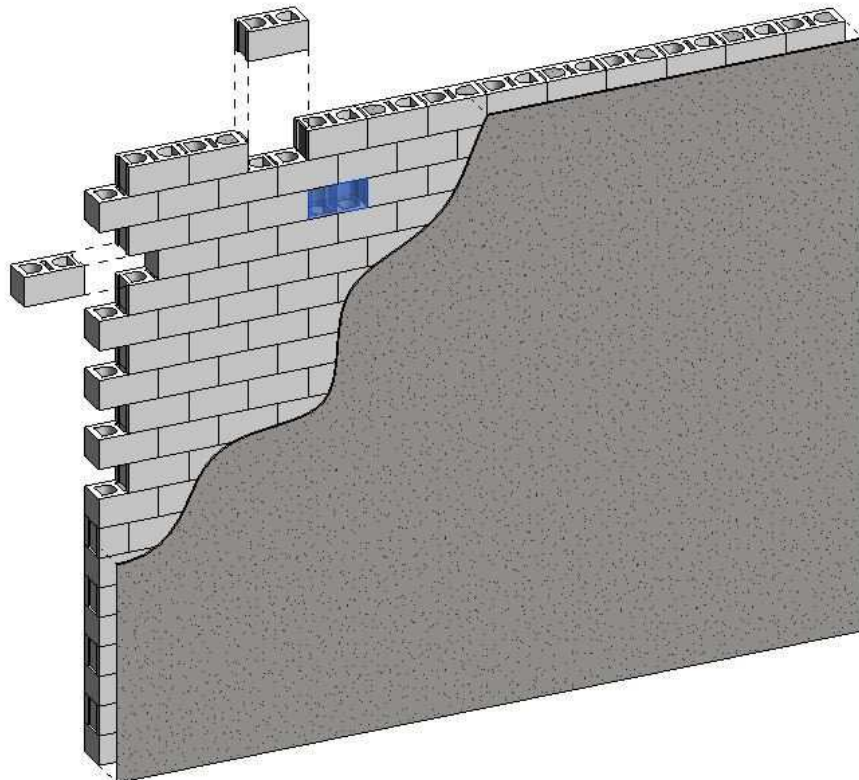
### 3.3.3. Sistema constructivo

La construcción tradicional es la tecnología que consiste en la ejecución de mampostería estructural, bloques de hormigón (ver figura 10) con revoques de mortero en las caras exterior e interior (ver figura 11). La cimentación, la cubierta y los forjados de entresuelos se construyen con hormigón armado. Es un sistema de "obra húmeda", y por su simpleza, no necesita mano de obra especializada y como equipos requiere de herramientas manuales. En el mercado dominicano existen diferentes tipologías de bloques de hormigón vibrado, pero en construcción convencional, predominan los siguientes tipos: 10 cm · 20 cm · 40 cm; 15 cm · 20 cm · 40 cm y 20 cm · 20 cm · 40 cm (40). El espesor de la capa de revoque es variado. En algunos casos, al construir el muro los huecos de los bloques quedan vacíos y en otros uno de sus huecos se rellena de mortero.

Figura 10. Bloques de hormigón.



Figura 11. Muro de bloques de hormigón con revoque de mortero.



Vale mencionar que la estanqueidad al aire en las edificaciones es muy baja. Culturalmente el dominicano tiende a tener puertas y ventanas abiertas de par en par (como se dice coloquialmente) durante todo el día, con el fin de que se produzcan corrientes de aire que mejoren la sensación o confort térmico a pesar de que pueden empeorar el ambiente térmico en las horas más calurosas del día.

### 3.4. Situación energética

#### 3.4.1. Energía primaria y secundaria

La tabla 5 recoge los tipos de energía primaria y secundaria consumidos durante 2018 proporcionados por la Comisión Nacional de Energía de la República Dominicana (CNE) (7).

Tabla 5. Energía primaria y energía secundaria.  
Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.

<b>TIPOS DE ENERGÍA CONSUMIDA EN 2018</b>	
<b>Energía primaria</b>	Energía secundaria
<b>Petróleo crudo</b>	Energía eléctrica
<b>Gas natural</b>	GLP
<b>Carbón mineral</b>	Gasolinas + alcohol
<b>Hydroenergía</b>	Kerosene
<b>Leña</b>	Avtur
<b>Bagazo</b>	Diésel
<b>Solar</b>	Fuel oíl
<b>Viento</b>	Coque
<b>Otras</b>	Carbón vegetal
	Gases
	Biodiésel
	Lubricantes
	Cemento asfáltico
	Otros no energéticos

#### 3.4.2. Energía demandada en 2018

La tabla 6 muestra la importación y producción de energía primaria y secundaria y pone de manifiesto la fuerte dependencia energética del país respecto de terceros países. Traducido a términos porcentuales las importaciones de energía primaria representaron más del 70 % de las necesidades del país (7).

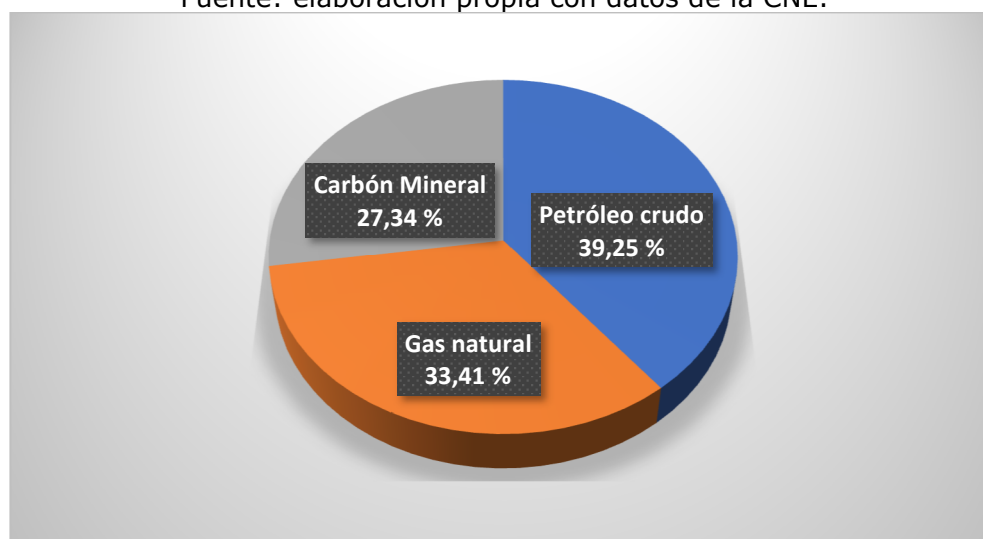
Ktep = kilotonelada equivalente de petróleo.

Tabla 6. Balance energético 2018, monto de cada energía.  
Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.

BALANCE ENERGÉTICO 2018 (ktep)	Energía primaria		BALANCE ENERGÉTICO 2018 (ktep)	Energía secundaria	
	PRODUCCIÓN	IMPORTACIÓN		PRODUCCIÓN	IMPORTACIÓN
<b>PETRÓLEO CRUDO</b>	0,00	1268,81	ENERGÍA ELÉCTRICA	1689,75	0,00
<b>GAS NATURAL</b>	0,00	1080,19	GLP	15,00	1096,96
<b>CARBÓN MINERAL</b>	0,00	883,89	GASOLINAS + ALCOHOL	269,90	957,32
<b>HIDRO</b>	191,27	0,00	KEROSENE	8,14	0,00
<b>LEÑA</b>	579,79	0,00	AVTUR	195,27	388,23
<b>BAGAZO</b>	350,38	0,00	DIÉSEL	357,78	1099,51
<b>SOLAR</b>	134,44	0,00	FUEL OIL	351,94	1348,75
<b>VIENTO</b>	106,96	0,00	COQUE	0,00	393,63
<b>OTRAS PRIMARIAS</b>	12,50	0,00	CARBÓN VEGETAL	81,16	0,00
<b>TOTAL ENERGÍA PRIMARIA</b>	1375,34	3232,89	GASES	13,36	0,00
			BIODIÉSEL	0,00	0,00
			LUBRICANTES	0,00	42,80
			CEMENTO ASFÁLTICO	0,00	76,56
			OTROS NO ENERGÉTICOS	0,00	67,44
			<b>TOTAL ENERGÍA SECUNDARIA</b>	2982,30	5471,22

En el gráfico 4 se presenta el desglose porcentual de las diversas energías primarias importadas. Corresponde al petróleo un 39,25 %, al gas natural con un 33,41 % y al carbón mineral un 27,34 %.

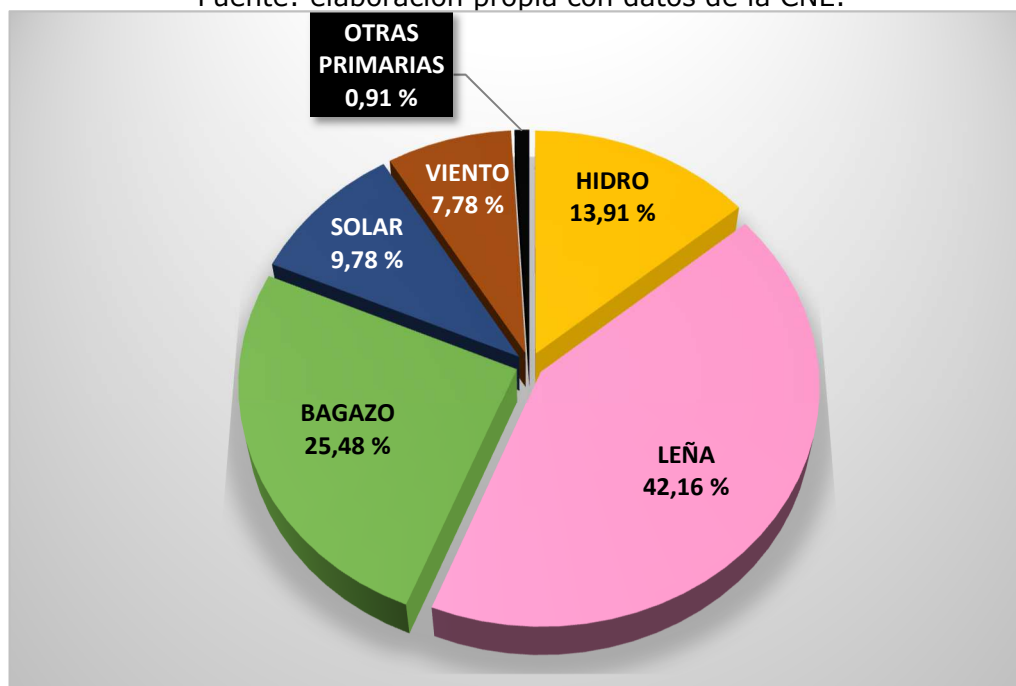
Gráfico 4. Porcentajes de la composición de las importaciones de energía.  
Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.



En lo que se refiere a la energía primaria producida por el país, el desglose en términos porcentuales correspondiente a cada tipo de energía se recoge en el gráfico 5. Dicho desglose otorga un 13,91 % a la hidroenergía, a la leña un 13,91 %, al bagazo un 25,48 %, a la solar un 9,78 %, la eólica un 7,78 % y un residual 0,91 % a otras.

Gráfico 5. Porcentajes de la producción nacional de energía primaria.

Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.



De la tabla 7 se deduce que la generación de energía eléctrica (en gigavatio-hora, GWh) a partir de energía primaria importada se distribuyó en 2018 de la siguiente manera: el 50,29 % se obtuvo de derivados del petróleo, el 24,11 % del gas natural y el 11,63 % del carbón mineral (11).

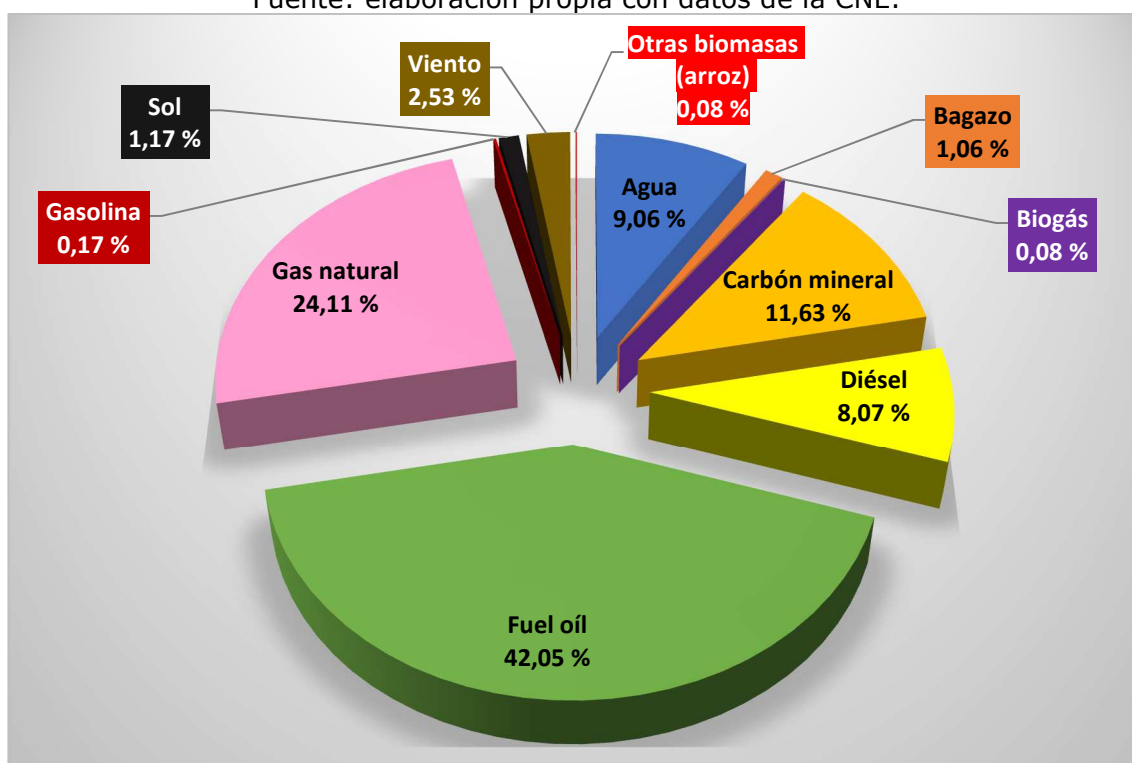
Tabla 7. Generación de energía eléctrica bruta por fuente, 2018.

Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.

<b>Generación bruta por fuente (GWh)</b>	
<b>Fuente</b>	<b>2018</b>
<b>Agua</b>	1779,52
<b>Bagazo</b>	209,11
<b>Biogás</b>	15,70
<b>Carbón mineral</b>	2284,73
<b>Diésel</b>	1585,62
<b>Fuel oíl</b>	8263,49
<b>Gas natural</b>	4737,28
<b>Gasolina</b>	32,73
<b>Sol</b>	230,45
<b>Viento</b>	497,48
<b>Otras biomasas (arroz)</b>	14,92
<b>Total nacional</b>	19 651,02

El gráfico 6 muestra los porcentajes de todas las fuentes de energía para generación eléctrica y deja ver el poco peso de las energías renovables (11).

Gráfico 6. Porcentajes de las fuentes de energía para generación eléctrica.  
Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.



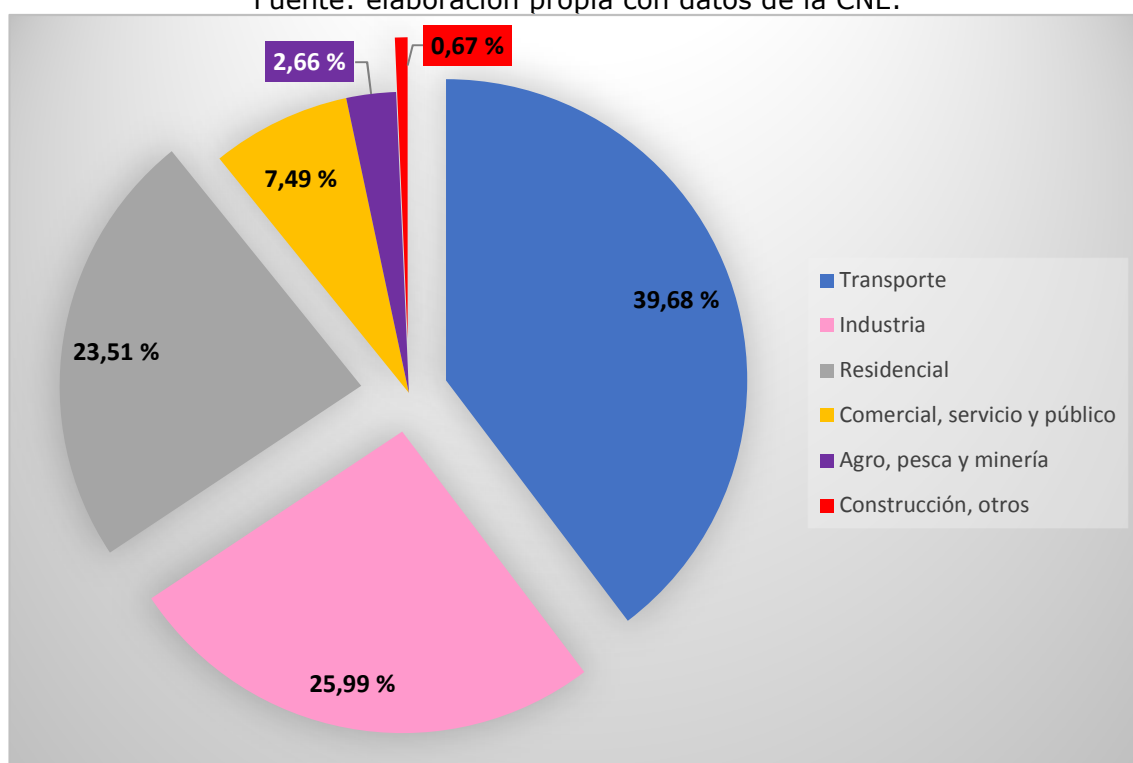
### 3.4.3. Consumo de energía por sectores

El desglose de consumo de energía por sectores manifiesta que el sector residencial consume 1439,69 ktep (tabla 8), es decir, el 23,51 % del total (gráfico 7) (7).

Tabla 8. Consumo energético total por sectores de consumo.  
Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.

<b>Consumo energético 2018 (ktep)</b>	
<b>Transporte</b>	2430,01
<b>Industria</b>	1591,52
<b>Residencial</b>	1439,69
<b>Comercial, servicio y público</b>	458,74
<b>Agro, pesca y minería</b>	162,69
<b>Construcción, otros</b>	41,18
<b>Consumo energético total</b>	6123,83

Gráfico 7. Porcentajes por sectores de consumo del consumo energético total.  
Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.



En el sector residencial, la energía destinada a la cocción representó un 68,27 %, y a la ventilación y acondicionamiento de aire un 15,78 %. Ahora bien, el consumo eléctrico en la cocción fue del 0,24 % mientras que en ventilación y aire acondicionado lo fue del 100 %. Los restantes usos tienen menores consumos como se pueden ver en la tabla 9 y el gráfico 8 (39) (10).

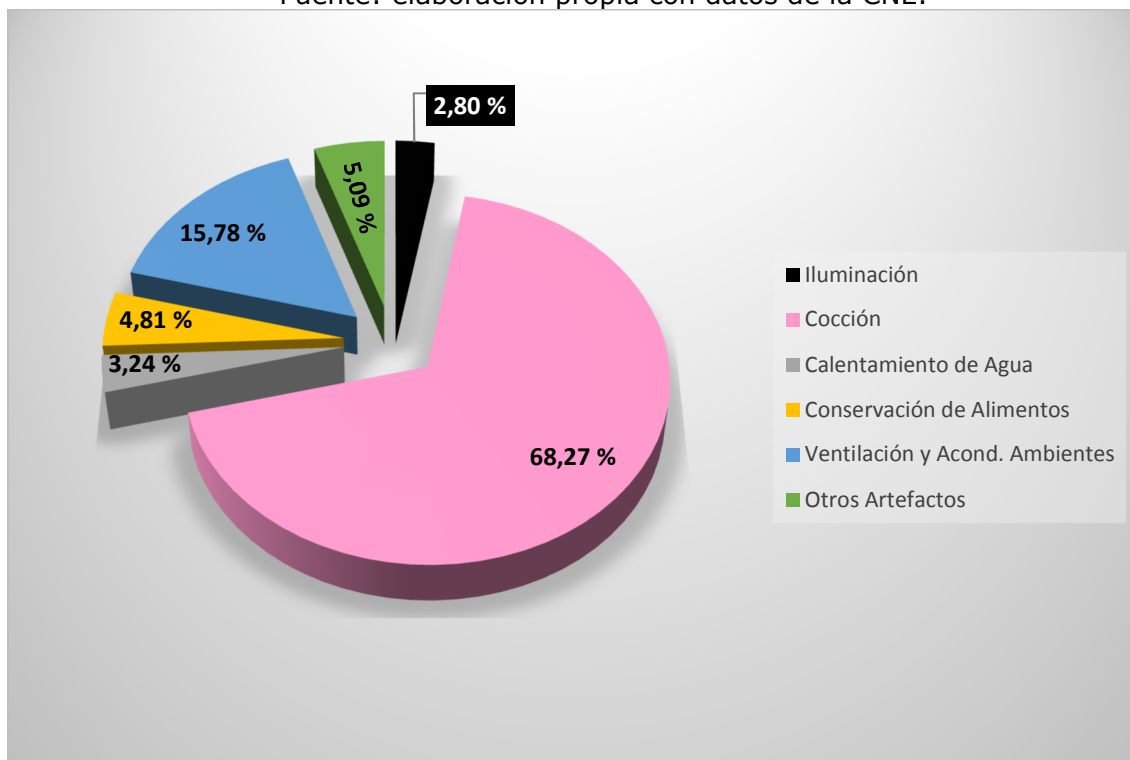
Tabla 9. Consumo energético neto por fuentes y usos en el sector residencial.  
Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.

Consumo de energía del sector residencial. Consumo de energía neta (tep)								
USOS	Gas licuado de petróleo (GLP)	Kerosene	Leña	Carbón vegetal	Otras primarias	Solar	Energía eléctrica	TOTAL
<b>Iluminación</b>	986	9640	0	0	0	0	27 850	38 476
<b>Cocción</b>	443 635	0	427 500	62 927	2579	0	2298	938 939
<b>Calentamiento de Agua</b>	15 574	0	13 521	3519	99	3374	8514	44 601
<b>Conservación de Alimentos</b>	0	0	0	0	0	0	66 191	66 191
<b>Ventilación y Acond. Ambientes</b>	0	0	0	0	0	0	217 037	217 037
<b>Otros Artefactos</b>	0	0	0	0	0	0	70 019	70 019
<b>TOTAL</b>	460 195	9640	441 021	66 446	2678	3374	391 909	1 375 263



Gráfico 8. Porcentajes de cada uso de la energía neta consumida en el sector residencial.

Fuente: elaboración propia con datos de la CNE.



#### 3.4.4. Déficit de producción de energía eléctrica

La energía eléctrica es la energía más consumida en la República Dominicana, ocupando en el sector residencial la tercera posición, pero siendo la única utilizada para confort interior.

El problema mayor del sector de producción eléctrica es que no es capaz de satisfacer la demanda. Sirva de ejemplo que el trimestre octubre-diciembre de 2018 la demanda de electricidad fue de 4311,55 GWh, que sólo fue satisfecha con 3666,67 GWh. Esto es, un déficit de 644,89 GWh. Como consecuencia de esta situación se producen cortes en el suministro eléctrico de una a seis horas, pudiendo llegar a 12 horas. En el trimestre que se ha puesto de ejemplo la duración media de los mencionados cortes fue de 2,68 horas (41).

## 4. Caracterización climática

### 4.1. Introducción

El clima es un factor que se toma en cuenta en la eficiencia energética en la edificación, Lo que requiere caracterizar climáticamente un país o región.

Se han desarrollado diferentes metodologías para caracterizar climáticamente una región o país. Entre las metodologías conocidas se pueden mencionar la metodología de Köppen-Geiger, de Strahler, la de los grados-día y la de los índices de severidad climática.

Esta zonificación climática se utiliza con diferentes propósitos:

1. Fundamentar las regulaciones térmicas con requisitos basados en prescripción y rendimiento.
2. Estandarizar dato para el cálculo de la energía demandada de los edificios.
3. Desarrollo de estándares energéticos.
4. Desarrollo de guías de diseño.

La caracterización en zonas climáticas es una tarea compleja debido a la interacción de varias variables independientes. Como consecuencia de esta complejidad existe una gran variedad de métodos que toman en cuenta diferentes variables climáticas. En el diseño de edificios y en el análisis de su demanda son de interés las variables climáticas que afectan el confort térmico interior y el intercambio de calor a través de los cerramientos del edificio, la ventilación y las infiltraciones. Las variables climáticas a considerar: temperatura seca, humedad relativa, radiación solar, dirección y velocidad del viento, pluviosidad y amplitud térmica (12) (13) (42). La metodología más utilizada es la de los grados-día que puede utilizarse de forma única aunque también es posible complementarla con la precipitación, en otros casos integra la radiación solar y pasa a llamarse Índice de Severidad Climática (13) (15) (16) (43) (44) (45) (46).

En esta tesis, para la caracterización climática de la República Dominicana (R. D.) en zonas climáticas, se ha optado por la metodología denominada Índice de Severidad Climática, que es en la que se basa El Documento Básico He Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación de España (47) para posteriormente proponer una nueva metodología aplicada a la República Dominicana, que es aplicable en otros países con características climáticas similares, tales como: Haití, Cuba, Jamaica, Las Bermudas, Las Bahamas, Islas Vírgenes, Puerto Rico, Costa caribeña de Venezuela, México, Colombia, Panamá, Costa Rica, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Guyana Francesa, etc. Y esta es la metodología que a continuación se detalla.

### 4.2. Relación clima-energía en la República Dominicana

La República Dominicana y otros países caribeños aún están trabajando en la elaboración de una normativa relacionada con el confort térmico y la eficiencia energética mientras otros todavía no se lo plantean. A día de hoy la República Dominicana no está caracterizada climáticamente conforme a la severidad climática.

A tenor, de que el país se incardina en la zona tropical húmeda, el clima en ciertas zonas resulta agobiante. Se trata de un país muy soleado en el que por su situación geográfica el ángulo de incidencia de los rayos solares con respecto al plano horizontal resulta ser cercano a los 90° sexagesimales en el solsticio de verano y aunque va decreciendo, una vez pasado este, se mantiene en valores elevados provocando una importante radiación solar sobre las cubiertas de los edificios.

Es un hecho constatado que las condiciones climáticas del trópico húmedo son causa de discomfort térmico. En evitación de esto se acude, quien puede, a instalar aire acondicionado sin indicación de su Ratio de Eficiencia Energética Estacional (SEER, *Seasonal Energy Efficiency Ratio*, por sus siglas en inglés) y ni si quiera su Ratio de Eficiencia Energética (EER, *Energy Efficiency Ratio*, por sus siglas en inglés).

### 4.3. Grados-día

La eficiencia energética se ha convertido en una condición primordial en el diseño de edificios debido al elevado consumo de energía en la edificación, lo que conlleva elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> y un costo elevado del funcionamiento de las instalaciones térmicas (48). Es necesario realizar un análisis de la demanda de energía en el caso de calefacción o enfriamiento de los edificios (49) (50) (51) (52). Existen diversos métodos para realizar el citado análisis, que se diferencian en su complejidad, en el número de parámetros ambientales tenidos en cuenta y el tiempo necesario para realizar los cálculos. Los métodos más sencillos se aplican al estado estacionario, requieren menos datos y sus resultados son válidos para sistemas simples. El más conocido es el de los grados-día (53) (54) (51).

Los grados-día son un indicador importante y versátil del diseño climático. Se utiliza en campos como la energía, arquitectura, agricultura, entomología, etc. Este método se basa en determinar las variaciones de la temperatura exterior, en términos de amplitud y frecuencia, con respecto a una temperatura de referencia o "temperatura base ( $T_b$ )". Este método es de gran utilidad en el diseño del edificio y de sus instalaciones térmicas ya que posibilita estimar el consumo de energía y en consecuencia las emisiones de carbono (49) (55) (56) (57) (58). Diversos autores utilizan este método para evaluar el impacto del cambio climático, en particular el aumento de la temperatura; y lo consideran muy adecuado para el análisis de la severidad de la temperatura ambiente exterior y su duración (55) (59) (16) (60) (61). Por otra parte, es un método que brinda una valoración rápida del consumo energético de las instalaciones de confort térmico de un edificio (53) (49) (62) (54) (63) (51) (15) (60).

Los grados-día permiten clasificar un país o región en zonas climáticas, es decir, caracterizar la severidad climática de un lugar pudiendo compararla con la de otro. Este método requiere elegir una misma temperatura base ( $T_b$ ) para todos los lugares que se quieran comparar (53) (63) (64) (65) (59) (66) (15) (67). Para evaluar la demanda-consumo de energía y la eficacia de las medidas de eficiencia energética de un edificio se necesita elegir una  $T_b$  apropiada al mismo. En el caso de que lo anterior se requiera para una región, se elegirá una  $T_b$  para la misma (68) (69) (65) (17) (70) (71). En el cálculo de los grados-día, la

temperatura base o de referencia se considera una temperatura de confort humano (72).

Los grados-día y su utilidad dependen de dos aspectos distintos y no relacionados: la metodología de su cálculo y la forma en que se aplican en la edificación (16). Las técnicas de cálculo de los grados-día dependen de la frecuencia de registro de los datos de temperatura, por ejemplo, los datos de temperatura media horaria dan mejores estimaciones de los grados-días que los datos de temperatura media diaria o mensual. Por otro lado, la aplicación de los grados-día varía en función de la temporada, pudiendo ser esta de calefacción o refrigeración. Esto último da lugar a que se tengan grados-día de refrigeración (CDD, *cooling degree-days*, por sus siglas en inglés) y grados-día de calefacción (HDD, *heating degree-days*, por sus siglas en inglés) (55).

Para determinar los grados-día se necesita la temperatura base y los datos referidos a la temperatura exterior. Se define la temperatura base ( $T_b$ ) como aquella temperatura de bulbo seco del aire exterior a la cual no se necesita el funcionamiento de los sistemas de calefacción o refrigeración para asegurar las condiciones de confort térmico (55) (60) (63) (68) (58) (73). En esta situación el valor de la temperatura del aire interior (temperatura del punto de ajuste o de consigna), la transferencia total de calor hacia el exterior se compensa con la ganancia de calor procedente del sol, los ocupantes, las luces y los equipos (73). En el caso de que la temperatura del aire exterior esté por debajo de la temperatura base de calefacción, se necesita que el sistema de calefacción esté en funcionamiento (55) (60) (63) (68). Por otro lado, los sistemas de enfriamiento deberán funcionar si la temperatura del aire exterior está por encima de la temperatura base de enfriamiento.

Los valores de HDD y CDD han sido calculados y tabulados en muchos países utilizando diferentes  $T_b$ : Italia (49) (74), India (48), Rumanía (50), Grecia (53) (75), Turquía (54) (62) (76) (77), Suiza (59), Marruecos (78), Arabia Saudita (79) (80), España (81), China (82). De la literatura revisada se desprende que, hasta ahora, tales valores no se han calculado para la R. D. Por esta razón, como aporte de esta tesis, se ha trabajado para calcular por primera vez estos valores de los grados-día utilizando diferentes  $T_b$ . Para ello se han tomado los datos de temperatura media horaria correspondientes al periodo 1998-2015 de 65 localidades. Como consecuencia de este trabajo se ha caracterizado el país en zonas climáticas.

#### 4.3.1. Metodología de cálculo de los grados-día utilizada para la República Dominicana

Existen varios métodos para calcular los grados-día. Generalmente, la elección está condicionada por la disponibilidad de datos climáticos de cada localidad. Con el fin de estimar los grados-día a partir de un conjunto reducido de datos climáticos. Diversos autores han desarrollado en los últimos años numerosos métodos, a menudo basados en la temperatura media diaria o mensual. Ahora bien, este no es el caso de la R. D., ya que se dispone de la temperatura de cada hora. Esta temperatura se ha obtenido de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Oficina Nacional de Meteorología de la República Dominicana (ONAMET) y de la National Solar Radiation Database (NSRDB) perteneciente al National Renewable Energy Laboratory (NREL) del Departamento de Energía de

los Estados Unidos de América (83). Esta base de datos dispone de mediciones, vía satélite, realizadas cada media hora.

A continuación, se exponen cada uno de los pasos de la metodología utilizada para el cálculo de los grados-día de la R. D.

Se utilizó la metodología de los grados-hora promedio. Calculados a partir del registro de temperatura por hora. El período de tiempo habitual es de 24 horas, de ahí el término grados-día, pero es posible trabajar con grados-hora. Los grados-día son, de hecho, grados-hora promedio o grados-hora divididos por 24 (16).

Tenga en cuenta que los grados-día diarios calculados se suman durante un mes para obtener valores mensuales. Los valores mensuales a su vez se pueden sumar para dar valores anuales o estacionales. Los grados-día de calefacción estacional, por ejemplo, solo toman esos meses cuando el sistema de calefacción está encendido (normalmente de octubre a abril en el Reino Unido) (16).

#### 4.3.1.1. Grados-hora promedio diario de calefacción para un periodo de años

El cálculo de los grados-día de calefacción (GDC) para un periodo de años consta de los siguientes pasos:

1.- Se eligió un periodo de 18 años, que estadísticamente es significativo, para la temperatura exterior horaria ( $T_{e,h}$ , °C) , lo que nos proporcionó unos 157 680 datos.

2.- Se tomó una temperatura base ( $T_b$ , °C).

3.- De los 157 680 datos se seleccionaron aquellos que cumpliesen con la condición:

$$T_{e,h} < T_b \quad \text{Ec.1}$$

4.- Se hallaron las diferencias entre  $T_b$  y  $T_{e,h}$ , donde  $T_{e,h}$  cumple con la ecuación 1:

$$GHC = T_b - T_{e,h} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

$GHC$  = Grados-hora de calefacción, °C-hora.

$$T_{e,h} < T_b$$

5 - Se sumaron los  $GHC$  de cada día, obteniéndose los grados-hora para cada día de calefacción (grados-hora de calefacción diario):

$$GHCD = \sum_{n=1}^{24} (T_b - T_{e,h})^+ = \sum_{n=1}^{24} GHC \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

$GHCD$ : Grados-hora de calefacción diario, °C-hora/día.

El signo "+" significa que solo se toman los resultados positivos.

6.- Se dividieron cada uno de los  $GHCD$  por 24, obteniéndose los grados-hora promedio de calefacción diario:

$$\overline{GHCD} = \left[ \sum_{h=1}^{24} (T_b - T_{e,h})^+ \right] \div 24 = \frac{GHCD}{24} \quad Ec. 4$$

Donde:

$\overline{GHCD}$ : Promedio de los grados hora diarios o de un día de calefacción. Donde  $\overline{GHCD}$  equivale a los grados-día de calefacción (GDC) para un día (grados-día diario), °C-día.

7.- Se sumaron los 365  $\overline{GHCD}$  de cada año: obteniéndose los grados-hora promedio anuales de calefacción (grados-día de calefacción anual) de cada año del periodo elegido.

$$\overline{GHCA} = \sum_{n=1}^{365} \overline{GHCD} \quad Ec. 5$$

Donde:

$\overline{GHCA}$ : Promedio de los grados-hora anuales o de un año de calefacción (grados-día de calefacción anual), °C-día/año.

8. Se suman los grados-día de calefacción anual de cada año del periodo elegido y se divide por el número de años del periodo elegido (N), obteniéndose los grados-hora promedio de calefacción (grados-día de calefacción anual promedio) para el periodo de años elegido.

$$\overline{GHCP} = \frac{\sum_1^n \overline{GHCA}}{N} \quad Ec. 6$$

#### 4.3.1.2. Grados-hora promedio diario de refrigeración para un periodo de años

El cálculo de los grados-hora promedio de refrigeración para un periodo de años consta de los siguientes pasos:

1.- Se eligió un periodo de 18 años, que estadísticamente es significativo, para la temperatura de bulbo seco exterior horaria ( $T_{e,h}$ , °C), lo que nos proporcionó unos 157 680 datos.

2.- Se tomó una temperatura base ( $T_b$ , °C).

3.- De los 157 680 datos se seleccionaron aquellos que cumplieren con la condición:

$$T_{e,h} > T_b \quad Ec. 7$$

4.- Se hallaron las diferencias entre  $T_b$  y  $T_{e,h}$ , donde  $T_{e,h}$  cumple con la ecuación 7:

$$GHR = T_{e,h} - T_b \quad Ec. 8$$

Donde:

$GHR$  = Grados-hora de refrigeración, °C-hora.

$T_{e,h} > T_b$

5 - Se sumaron los GHR de cada día, obteniéndose los grados-hora para cada día de refrigeración (grados-hora de refrigeración diario):

$$GHRD = \sum_{n=1}^{24} (T_{e,h} - T_b)^+ = \sum_{n=1}^{24} GHR \quad Ec. 9$$

Donde:

*GHRD*: Grados-hora de refrigeración diario, °C-hora/día.

El signo "+" significa que solo se toman los resultados positivos.

6.- Se dividieron cada uno de los *GHRD* por 24, obteniéndose los grados-hora promedio de refrigeración diario:

$$\overline{GHRD} = \left[ \sum_{h=1}^{24} (T_{e,h} - T_b)^+ \right] \div 24 = \frac{GHRD}{24} \quad Ec. 10$$

Donde:

$\overline{GHRD}$ : Promedio de los grados-hora diarios o de un día de refrigeración. Donde  $\overline{GHRD}$  equivale a los grados-día de refrigeración (GDR) para un día (grados-días diario), °C-día.

7.- Se sumaron los 365  $\overline{GHRD}$  de cada año: obteniéndose los grados-hora promedio anuales de refrigeración (grados-día de refrigeración anual) de cada año del periodo elegido.

$$\overline{GHRA} = \sum_{n=1}^{365} \overline{GHRD} \quad Ec. 11$$

Donde:

$\overline{GHRA}$ : Promedio de los grados-hora anuales o de un año de refrigeración (grados-día de refrigeración anual), °C-día/año

8. Se suman los grados-día de refrigeración anual de cada año del periodo elegido y se divide por el número de años del periodo elegido (N), obteniéndose los grados-hora promedio de refrigeración (grados-día de refrigeración anual promedio) para el periodo de años elegido.

$$\overline{GHRP} = \frac{\sum_1^n \overline{GHRA}}{N} \quad Ec. 12$$

Este método, con base horaria, es el más riguroso disponible y el que proporciona la estimación más exacta, pero la limitación principal consiste en la necesidad de los archivos de la temperatura externa por hora, que no están siempre disponibles para algunas localidades (16) (48) (49) (51) (53) (54) (55) (60) (77) (78) (62) (67) (80) (84).

#### 4.4. Índice de severidad climática

Para desarrollar normas sobre la demanda de energía de un edificio, previamente es necesario conocer la severidad climática del lugar donde se edificará.

El índice de severidad climática (ISC) permite cuantificar la rigurosidad climática de una región, zona o localidad. El cálculo de este índice requiere, al menos, conocer la temperatura seca del aire, la radiación solar (85). Este ISC se refiere al índice de la severidad climática de invierno (ISCI) y al de verano (ISCV) lo que permite calcular la demanda energética, tanto de calefacción como refrigeración de un edificio. Está bien constatado la buena correlación tanto del índice de la SCI como SCV con los grados-días y la radiación solar. La principal ventaja de esta metodología radica en que permite cuantificar la demanda energética de una determinada tipología de edificio en función de la zona climática en que se ubique (45) (46) (47) (86) (87).

Los cálculos realizados en esta tesis de los índices de la SCI y SCV de la R.D. se basó en la metodología especificada en el Documento Básico HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación de España 2009, CTE-09 (Orden VIV/984/2009 de 15 de abril, por la que se modifican determinados documentos básicos del Código Técnico de la Edificación aprobados por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, y el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre. (BOE 23-abril-2009). Como ya se ha sugerido, el concepto de severidad climática combina los grados-día y la radiación solar de una localidad y en consecuencia cuando dos localidades tienen la misma severidad climática, por ejemplo, de invierno (SCI) la demanda energética de calefacción de un mismo edificio situado en ambas localidades es sensiblemente igual. De manera idéntica sucede con la severidad climática de verano (SCV). La cuantificación de la severidad climática necesita de una referencia, a la que se le asigna el valor 1. En el caso español, la citada referencia es la severidad climática de Madrid (45) (46) (86) (87) (47) (88) (89). Otra manera de verlo es: como la relación entre las demandas de energía de un edificio en cualquier ubicación dada sobre el mismo edificio en una ubicación de punto de referencia. Se dice que una zona o localidad dada tiene una severidad climática "X" veces más severa que otra si la demanda de energía de un determinado edificio es "X" veces mayor en la primera localidad que en la segunda.

El CTE-09 (47), nombra con las letras A, B, C, D y E las severidades climáticas de invierno, donde a la "A" corresponde la menor severidad y a la "E" la mayor, como puede observarse en la tabla 10.

Tabla 10. Severidad Climática de Invierno (SCI).

Fuente: CTE-09 apéndice D zonas climáticas.

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
$SCI \leq 0,3$	$0,3 < SCI \leq 0,6$	$0,6 < SCI \leq 0,95$	$0,95 < SCI \leq 1,3$	$SCI > 1,3$

En lo que se refiere a las severidades climáticas de verano, el CTE-09 las nombra con los números 1, 2, 3 y 4, donde el "1" corresponde a la menor severidad y el "4" a la mayor, como puede verse en la tabla 11.

Tabla 11. Severidad Climática de Verano (SCV).

Fuente: CTE-09 apéndice D zonas climáticas.

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
$SCV \leq 0,6$	$0,6 < SCV \leq 0,9$	$0,9 < SCV \leq 1,25$	$SCV > 1,25$



Combinando las 5 severidades de invierno con las 4 de verano se obtienen 20 zonas climáticas distintas, pero en el caso español son únicamente 13 ya que el resto no se dan en el territorio de España. Las zonas que aparecen en el citado CTE-09 son consecuencia de la combinación de los índices SCI y SCV (45) (47) y están reflejadas en la tabla 12.

Tabla 12. Zonas climáticas.  
Fuente: CTE-09 apéndice D zonas climáticas.

<b>SC (verano)</b>	A4	B4	C4		E1
	A3	B3	C3	D3	
			C2	D2	
			C1	D1	
	<b>SC (invierno)</b>				

En el caso de estudio de esta tesis, primero se determinaron los grados-día (GD) en base horaria de 65 observatorios meteorológicos, para después calcular los índice de severidades climáticas de invierno y verano de cada uno de ellos, siguiendo lo especificado en el Código Técnico de la Edificación de España de 2009. Lo que permitió caracterizar la R. D. en zonas climáticas conforme a su severidad.

#### 4.4.1. Método de cálculo de las severidades climáticas

Según el CTE-09, en función de la disponibilidad de datos climáticos existen dos correlaciones alternativas: una combina los grados-día (GD) con la radiación solar y la otra los grados-día (GD) con el ratio entre número de horas de sol y número de horas de sol máximas (n/N) (46) (47). En esta tesis, el cálculo de los índice de severidad climática de invierno (SCI) y verano (SCV) se realizó utilizando la correlación que combina los grados-día (GD) con la radiación solar, a tenor de los datos disponibles de la R. D.

##### 4.4.1.1. Caso de la severidad climática de invierno (SCI)

En el cálculo de la severidad climática de invierno (diciembre, enero y febrero) se siguieron los siguientes pasos:

- 1.- Para cada uno de los 65 observatorios meteorológicos se tomó la base de datos de temperaturas de bulbo seco medias horarias ( $\overline{T_h}$ , °C) y de radiación solar global horaria correspondiente al periodo 1998-2015.
- 2.- Para cada día del periodo se calcularon los grados-hora promedio diario de calefacción (GDC) con temperatura base ( $T_b$ ) igual a 20 °C, tal y como se describió en la metodología del punto 4.3.1.1.
- 3.- A partir de los GDC se obtuvo la media mensual para los meses invernales de cada año del periodo.
- 4.- Se sumó la radiación solar global horaria de cada día, obteniéndose la radiación solar global acumulada diaria para cada día de los meses invernales, expresada en [kWh/m<sup>2</sup>].

5.- A partir de la radiación solar global acumulada diaria se obtuvo la media mensual de la radiación global acumulada para los meses invernales de cada año del periodo 1998-2015, expresada en [kWh/m<sup>2</sup>].

6.- Se combinaron la media de los grados-hora promedio de calefacción (GDC) de los meses de invierno, con la media de la radiación global acumulada de dichos meses para obtener el índice de severidad climática de invierno para cada año del periodo 1998-2015 mediante la ecuación siguiente:

$$ISCI = a * Rad + b * GDC + c * Rad * GDC + d * (Rad)^2 + e * (GDC)^2 + f \quad Ec.13$$

Donde:

*ISCI*: Índice de severidad climática de invierno para cada año.

*GDC*: Media de los grados-hora promedio de calefacción con temperatura base (*T<sub>b</sub>*) de 20 °C para los meses invernales. (Calculados en base horaria y posteriormente divididos por 24).

*Rad*: Media de la radiación global acumulada para los meses de enero, febrero, y diciembre expresada en [kWh/m<sup>2</sup>].

*a, b, c, d, e, f* son los coeficientes de regresión, cuyos valores se indican en la tabla 13:

Tabla 13. Coeficientes de regresión de la severidad climática de invierno.

Fuente: CTE-09 apéndice D zonas climáticas.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
$-8,35 \cdot 10^{-3}$	$3,72 \cdot 10^{-3}$	$-8,62 \cdot 10^{-6}$	$4,88 \cdot 10^{-5}$	$7,15 \cdot 10^{-7}$	$-6,81 \cdot 10^{-2}$

7.- Se obtuvo el índice de severidad climática media de invierno ( $\overline{ISCI}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$\overline{ISCI} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (ISCI)_i}{N}$$

Donde :

*N* = número de años del periodo 1998-2015 (18 años).

8.- Finalmente, con el índice de severidad climática media de invierno ( $\overline{ISCI}$ ) calculado en el paso anterior y con la tabla 10 se obtuvo la severidad climática de invierno para cada observatorio meteorológico.

#### 4.4.1.2. Caso de la severidad climática de verano (SCV).

En el cálculo de la severidad climática de verano (junio, julio, agosto y septiembre) se siguieron los siguientes pasos:

1.- Para cada uno de los 65 observatorios meteorológicos se tomó la base de datos de temperaturas de bulbo seco medias horarias ( $\overline{T}_h$ , °C) y de radiación solar global horaria correspondiente al periodo 1998-2015.

2.- Para cada día del periodo se calcularon los grados-hora promedio diario de refrigeración (GDR) con temperatura base (*T<sub>b</sub>*) igual a 20 °C, tal y como se describió en la metodología del punto 4.3.1.2.

3.- A partir de los GDC se obtuvo la media mensual para los meses de verano de cada año del periodo.

4.- Se sumó la radiación solar global horaria de cada día, obteniéndose la radiación solar global acumulada diaria para cada día de los meses de verano, expresada en [kWh/m<sup>2</sup>].

5.- A partir de la radiación solar global acumulada diaria se obtuvo la media mensual de la radiación global acumulada para los meses de verano de cada año del periodo 1998-2015, expresada en [kWh/m<sup>2</sup>].

6.- Se combinaron la media de los grados-hora promedio de refrigeración (GDR) de los meses de verano, con la media de la radiación global acumulada de dichos meses para obtener el índice de severidad climática de verano para cada año del periodo 1998-2015 mediante la ecuación siguiente:

$$ISCV = a * Rad + b * GDR + c * Rad * GDR + d * (Rad)^2 + e * (GDR)^2 + f \quad Ec. 14$$

Donde:

*ISCV*: Índice de severidad climática de verano para cada año.

*GDR*: Media de los grados-hora promedio de refrigeración con temperatura base (*T<sub>b</sub>*) de 20 °C para los meses de verano. (Calculados en base horaria y posteriormente divididos por 24).

*Rad*: Media de la radiación global acumulada para los meses de junio, julio, agosto y septiembre expresada en [kWh/m<sup>2</sup>].

*a, b, c, d, e, f* son los coeficientes de regresión, cuyos valores se indican en la tabla 14:

Tabla 14. Coeficientes de regresión de la severidad climática de verano.  
Fuente: CTE-09 apéndice D zonas climáticas.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
$3,724 \cdot 10^{-3}$	$1,409 \cdot 10^{-2}$	$-1,869 \cdot 10^{-5}$	$-2,053 \cdot 10^{-6}$	$-1,389 \cdot 10^{-5}$	$-5,434 \cdot 10^{-1}$

7.- Se obtuvo el índice de severidad climática media de verano ( $\overline{ISCV}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$\overline{ISCV} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (ISCV)_i}{N}$$

Donde :

*N* = número de años del periodo 1998-2015 (18 años).

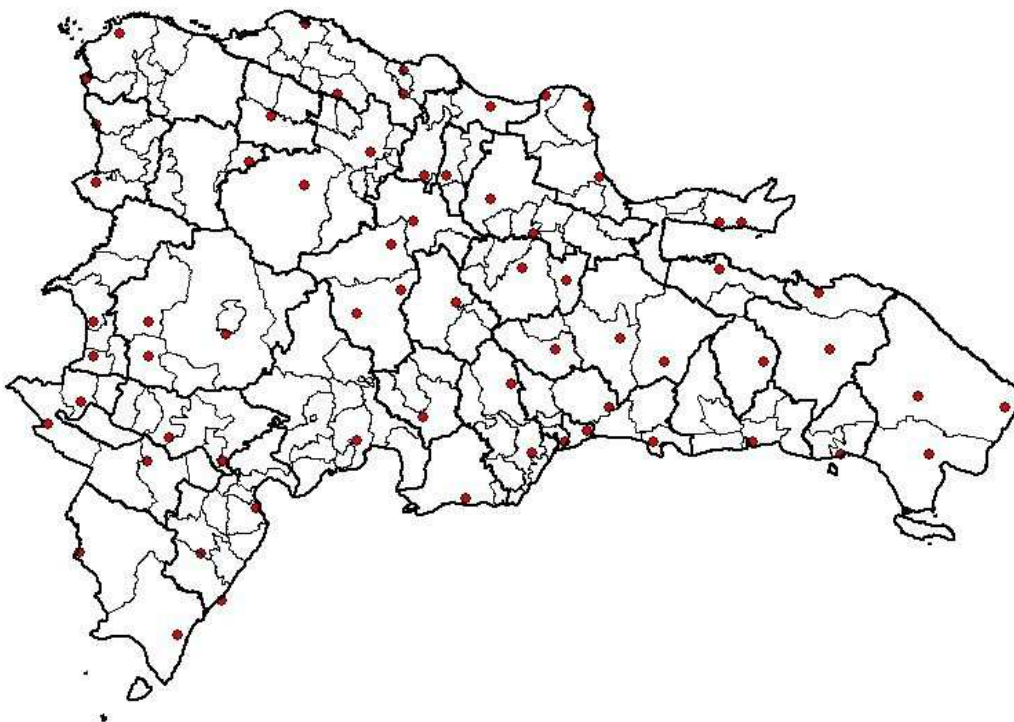
8.- Finalmente, con el índice de severidad climática media de verano ( $\overline{ISCV}$ ) calculado en el paso anterior y con la tabla 11 se obtuvo la severidad climática de verano para cada observatorio meteorológico.

#### 4.5. Observatorios meteorológicos elegidos y sus variables climáticas más relevantes

Los 65 observatorios meteorológicos fueron elegidos por la Oficina Nacional de Meteorología de la República Dominicana (ONAMET). Estos 65 observatorios se ubican en el Distrito Nacional (capital dominicana), en las capitales de las 31

provincias dominicanas y otros municipios importantes, como puede verse en el mapa de la figura 12.

Figura 12. Distribución de los 65 puntos de monitoreo en el territorio dominicano.



Se eligió el periodo 1998-2015 por ser el más largo con datos climáticos horarios completos necesarios para caracterizar climáticamente la R.D.

Los datos climáticos del periodo 1998-2015 correspondientes a los citados observatorios procedieron de dos fuentes:

1. La Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET).
2. La National Solar Radiation Database (NSRDB) perteneciente al National Renewable Energy Laboratory (NREL) del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América (83). Esta base de datos dispone de mediciones, vía satélite, realizadas cada media hora.

Dichos datos climáticos fueron los siguientes:

1. Radiación horizontal difusa en  $W/m^2$ .
2. Radiación normal directa en  $W/m^2$ .
3. Radiación horizontal global en  $W/m^2$ .
4. Radiación de cielo despejado en  $W/m^2$ .
5. Temperatura de punto de rocío en  $^{\circ}C$ .
6. Temperatura ambiente de bulbo seco en  $^{\circ}C$ .
7. Presión atmosférica en mbar.
8. Humedad relativa en %.
9. Agua precipitable en mm.
10. Dirección del viento en grados sexagesimales.
11. Velocidad del viento en m/s.

12. Año meteorológico típico (AMT) o año típico meteorológico (ATM) comúnmente conocido por sus siglas en inglés TMY (*Typical Meteorological Year*).

Además, para cada observatorio, se obtuvo la latitud (grados decimales), longitud (grados decimales) y altitud en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). La tabla 15 muestra de cada observatorio meteorológico su latitud, longitud, altitud, localidad y provincia a la que pertenece.

Tabla 15. Observatorios meteorológicos elegidos por ONAMET.

<b>N.º</b>	<b>LOCALIDAD</b>	<b>PROVINCIA</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>ALTITUD (m s. n. m.)</b>
1	<b>Aeropuerto La Unión</b>	Puerto Plata	19,73	-70,58	35
2	<b>Altamira</b>	Puerto Plata	19,65	-70,82	430
3	<b>Arroyo Barril</b>	Samaná	19,21	-69,42	193
4	<b>Azua</b>	Azua	18,45	-70,74	91
5	<b>Baní</b>	Peravia	18,25	-70,34	38
6	<b>Barahona</b>	Barahona	18,21	-71,1	48
7	<b>Bayaguana</b>	Monte Plata	18,73	-69,62	43
8	<b>Bonao</b>	Monseñor Nouel	18,93	-70,38	184
9	<b>Cabrera</b>	María Trinidad Sánchez	19,61	-69,9	83
10	<b>Cevicos</b>	Sánchez Ramírez	19,01	-69,98	84
11	<b>Constanza</b>	La Vega	18,89	-70,74	1228
12	<b>Cotuí</b>	Sánchez Ramírez	19,05	-70,14	57
13	<b>Dajabón</b>	Dajabón	19,53	-71,7	45
14	<b>Duvergé</b>	Independencia	18,37	-71,5	33
15	<b>El Cercado</b>	San Juan	18,73	-71,5	891
16	<b>El Seibo</b>	El Seibo	18,77	-69,02	115
17	<b>Elías Piña</b>	Elías Piña	18,85	-71,7	539
18	<b>Enriquillo</b>	Barahona	17,89	-71,22	0
19	<b>Gaspar Hernández</b>	Españat	19,61	-70,26	61
20	<b>Hato Mayor</b>	Hato Mayor	18,73	-69,26	86
21	<b>Herrera</b>	Santo Domingo	18,45	-69,98	41
22	<b>Higüey</b>	La Altagracia	18,61	-68,7	93
23	<b>Hondo Valle</b>	Elías Piña	18,73	-71,7	1197
24	<b>Jarabacoa</b>	La Vega	19,13	-70,62	531
25	<b>Jimaní</b>	Independencia	18,49	-71,86	57
26	<b>La Castilla</b>	La Vega	18,97	-70,58	1127
27	<b>La Descubierta</b>	Independencia	18,57	-71,74	208
28	<b>La Romana</b>	La Romana	18,41	-68,98	26
29	<b>La Vega</b>	La Vega	19,21	-70,54	143
30	<b>La Victoria</b>	Santo Domingo	18,57	-69,82	11
31	<b>Las Américas</b>	Santo Domingo	18,45	-69,66	15
32	<b>Las Matas de Farfán</b>	San Juan	18,85	-71,5	472
33	<b>Luperón</b>	Puerto Plata	19,89	-70,94	14
34	<b>Mao</b>	Valverde	19,57	-71,06	64
35	<b>Miches</b>	El Seibo	18,97	-69,06	49
36	<b>Moca</b>	Españat	19,37	-70,5	171

<b>37</b>	<b>Monción</b>	Santiago Rodríguez	19,41	-71,14	320
<b>38</b>	<b>Monte Cristi</b>	Monte Cristi	19,85	-71,62	23
<b>39</b>	<b>Monte Plata</b>	Monte Plata	18,81	-69,78	66
<b>40</b>	<b>Nagua</b>	María Trinidad Sánchez	19,37	-69,86	35
<b>41</b>	<b>Neiba</b>	Bahoruco	18,45	-71,42	-18
<b>42</b>	<b>Oviedo</b>	Pedernales	17,77	-71,38	17
<b>43</b>	<b>Pedernales</b>	Pedernales	18,05	-71,74	67
<b>44</b>	<b>Pepillo Salcedo</b>	Monte Cristi	19,69	-71,74	5
<b>45</b>	<b>Pimentel</b>	Duarte	19,17	-70,1	32
<b>46</b>	<b>Polo</b>	Barahona	18,05	-71,3	916
<b>47</b>	<b>Punta Cana</b>	La Altagracia	18,57	-68,38	18
<b>48</b>	<b>Restauración</b>	Dajabón	19,33	-71,7	643
<b>49</b>	<b>Río San Juan</b>	María Trinidad Sánchez	19,65	-70,06	57
<b>50</b>	<b>Sabana de la Mar</b>	Hato Mayor	19,05	-69,42	19
<b>51</b>	<b>Salcedo</b>	Hermanas Mirabal	19,37	-70,42	180
<b>52</b>	<b>Samaná</b>	Samaná	19,21	-69,34	95
<b>53</b>	<b>San Cristóbal</b>	San Cristóbal	18,41	-70,1	55
<b>54</b>	<b>San Francisco de Macorís</b>	Duarte	19,29	-70,26	116
<b>55</b>	<b>San José de Las Matas</b>	Santiago	19,33	-70,94	491
<b>56</b>	<b>San José de Ocoa</b>	San José de Ocoa	18,53	-70,5	495
<b>57</b>	<b>San Juan</b>	San Juan	18,81	-71,22	417
<b>58</b>	<b>San Pedro de Macorís</b>	San Pedro de Macorís	18,45	-69,3	11
<b>59</b>	<b>San Rafael del Yuma</b>	La Altagracia	18,41	-68,66	51
<b>60</b>	<b>Santiago</b>	Santiago	19,45	-70,7	168
<b>61</b>	<b>Santo Domingo</b>	Distrito Nacional	18,49	-69,9	34
<b>62</b>	<b>Tamayo</b>	Bahoruco	18,37	-71,22	15
<b>63</b>	<b>Villa Altagracia</b>	San Cristóbal	18,65	-70,18	184
<b>64</b>	<b>Yamasá</b>	Monte Plata	18,77	-70,02	83
<b>65</b>	<b>Yásica</b>	Puerto Plata	19,65	-70,58	224

#### 4.6. Resultados del cálculo de los grados-día

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología de los grados-día descrita en la sección 4.3.1. Para poder comparar estos resultados con los grados-día de diversas localidades de otros países se tomaron las diferentes temperaturas base ( $T_b$ ) utilizadas en dichos países.

En la tabla 16 se recogen los grados-día de calefacción (GDC) para el periodo 1998-2015. La temperatura base mínima presentada es 12 °C, a tenor de que por debajo de este valor los GDC toman el valor cero para todas las localidades. A partir de esta temperatura se incrementó la temperatura base en 0,5 °C sucesivamente hasta los 17,5 °C. La localidad La Castilla (n.º 26 de la tabla) es la que tiene los valores más altos en todas las  $T_b$ .

Tabla 16. Grados-día de calefacción 18 años con  $T_b$  de 12 °C a 17,5 °C.

N.º	LOCALIDAD	TEMPERATURA BASE (°C)											
		12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5
1	Aeropuerto La Unión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Altamira	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,02	0,06
3	Arroyo Barril	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Azua	0	0	0	0	0	0	0,0007	0,008	0,03	0,08	0,18	0,43
5	Baní	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Barahona	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0009	0,01
7	Bayaguana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002
8	Bonao	0	0	0	0	0,007	0,04	0,13	0,33	0,72	1,47	2,90	5,25
9	Cabrera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Cevicos	0,0003	0,003	0,009	0,02	0,04	0,08	0,17	0,32	0,59	1,05	1,86	3,18
11	Constanza	0	0,005	0,03	0,11	0,29	0,65	1,38	2,73	4,94	8,46	14,09	23,03
12	Cotuí	0	0	0	0,001	0,007	0,02	0,05	0,13	0,27	0,54	1,03	1,92
13	Dajabón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,01	0,04
14	Duvergé	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,01	0,04	0,08	0,17
15	El Cercado	0	0	0	0,005	0,02	0,05	0,11	0,26	0,58	1,20	2,26	4,03
16	El Seibo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	Elías Piña	0	0	0,004	0,02	0,05	0,09	0,22	0,48	0,98	1,87	3,33	5,71
18	Enriquillo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	Gaspar Hernández	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	Hato Mayor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	Herrera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0,03
22	Higüey	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	Hondo Valle	0	0	0	0,008	0,02	0,05	0,11	0,26	0,55	1,13	2,10	3,72
24	Jarabacoa	0	0,001	0,02	0,08	0,22	0,52	1,13	2,28	4,26	7,39	12,40	20,28
25	Jimaní	0	0	0	0	0,001	0,01	0,02	0,05	0,11	0,24	0,49	0,99
26	La Castilla	0,0002	0,01	0,06	0,17	0,41	0,91	1,85	3,50	6,17	10,40	17,09	27,75
27	La Descubierta	0	0	0	0,002	0,01	0,03	0,06	0,14	0,30	0,61	1,21	2,23
28	La Romana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	La Vega	0	0	0	0	0,009	0,03	0,13	0,37	0,86	1,82	3,57	6,50
30	La Victoria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0004	0,01
31	Las Américas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	Las Matas de Farfán	0	0,001	0,01	0,04	0,09	0,23	0,50	1,06	2,04	3,65	6,30	10,55
33	Luperón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	Mao	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,01	0,03	0,10
35	Miches	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	Moca	0	0	0	0	0	0	0,01	0,04	0,13	0,37	0,86	1,83



37	<b>Monción</b>	0	0	0	0	0,007	0,02	0,08	0,21	0,50	1,10	2,26	4,29
38	<b>Monte Cristi</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	<b>Monte Plata</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	0,03	0,1
40	<b>Nagua</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	<b>Neiba</b>	0	0	0	0	0	0,0009	0,01	0,03	0,07	0,13	0,30	0,67
42	<b>Oviedo</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	<b>Pedernales</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	<b>Pepillo Salcedo</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	<b>Pimentel</b>	0	0	0	0	0	0	0,002	0,01	0,07	0,19	0,43	0,90
46	<b>Polo</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001
47	<b>Punta Cana</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	<b>Restauración</b>	0	0	0	0	0,003	0,02	0,06	0,14	0,32	0,71	1,47	2,81
49	<b>Río San Juan</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	<b>Sabana de la Mar</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	<b>Salcedo</b>	0	0	0	0	0	0	0,001	0,02	0,05	0,17	0,47	1,10
52	<b>Samaná</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	<b>San Cristóbal</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,02
54	<b>San Francisco de Macorís</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,008	0,03	0,10	0,28
55	<b>San José de Las Matas</b>	0	0	0	0,0008	0,01	0,04	0,13	0,34	0,80	1,72	3,39	6,20
56	<b>San José de Ocoa</b>	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,02	0,06	0,13	0,32
57	<b>San Juan</b>	0	0,00003	0,007	0,03	0,08	0,20	0,45	0,98	1,96	3,57	6,23	10,57
58	<b>San Pedro de Macorís</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	<b>San Rafael del Yuma</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	<b>Santiago</b>	0	0	0	0	0	0,002	0,02	0,06	0,17	0,44	0,97	1,98
61	<b>Santo Domingo</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,02
62	<b>Tamayo</b>	0	0	0	0	0	0	0,003	0,02	0,04	0,09	0,20	0,47
63	<b>Villa Altagracia</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0,04	0,1	0,3
64	<b>Yamasá</b>	0	0	0	0	0	0	0,004	0,02	0,07	0,18	0,39	0,80
65	<b>Yásica</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	0,03	0,09

En la tabla 17 se recogen los GDC para el periodo de años elegido con  $T_b$  desde 18 °C hasta 25 °C. La temperatura base de 18,3 °C se incluyó por ser la temperatura base de EE. UU. De nuevo la localidad La Castilla (n.º 26 de la tabla) es la que tiene los mayores GDC con todas las  $T_b$ , mientras que la localidad Punta Cana (n.º 47 de la tabla) tiene los GDC más bajos.

Tabla 17. Grados-día de calefacción 18 años con  $T_b$  de 18 °C a 25 °C.

N.º	LOCALIDAD	TEMPERATURA BASE (°C)										
		18	18,3	18,5	19	19,5	20	21	22	23	24	25
1	Aeropuerto La Unión	0,01	0,01	0,02	0,07	0,22	0,72	4,18	16,72	53,12	129,35	252,56
2	Altamira	0,21	0,40	0,60	1,47	3,16	6,23	20,33	56,47	127,63	239,94	411,11
3	Arroyo Barril	0	0	0,00001	0,01	0,02	0,06	0,44	2,88	13,83	49,96	127,50
4	Azua	1,05	1,68	2,23	4,31	7,88	13,94	37,70	82,86	155,46	274,05	454,74
5	Baní	0	0	0	0,004	0,02	0,06	0,53	3,17	13,13	42,06	104,69
6	Barahona	0,04	0,06	0,08	0,19	0,47	1,10	4,54	16,12	47,03	109,69	222,32
7	Bayaguana	0,01	0,03	0,04	0,11	0,32	0,84	3,97	14,52	44,62	107,28	210,31
8	Bonao	9,03	12,29	15,01	24,49	39,15	60,52	126,16	227,82	384,34	600,56	857,83
9	Cabrera	0	0	0	0,01	0,02	0,07	0,66	4,23	19,47	63,95	151,49
10	Cevicos	5,27	7,03	8,47	13,28	20,33	30,46	64,33	125,48	221,12	360,79	558,32
11	Constanza	37,14	48,73	57,92	86,40	123,17	168,59	294,04	480,19	717,74	993,02	1301,82
12	Cotuí	3,43	4,77	5,88	9,75	15,72	24,72	56,49	115,97	210,22	350,28	550,47
13	Dajabón	0,12	0,22	0,32	0,80	1,80	3,75	13,41	38,67	90,74	176,57	309,76
14	Duvergé	0,38	0,61	0,84	1,69	3,20	5,86	17,99	45,78	97,93	190,76	344,69
15	El Cercado	6,97	9,61	11,83	19,42	30,70	46,59	95,05	175,14	304,98	486,35	710,57
16	El Seibo	0	0	0	0,001	0,01	0,03	0,24	1,71	9,14	37,40	104,14
17	Elías Piña	9,50	12,76	15,44	24,39	37,12	54,32	104,98	187,15	315,52	489,18	700,67
18	Enriquillo	0,0002	0,005	0,01	0,04	0,09	0,22	1,20	5,23	20,89	64,78	150,69
19	Gaspar Hernández	0	0,0001	0,002	0,01	0,05	0,14	1,26	6,81	27,59	82,61	182,52
20	Hato Mayor	0	0	0	0,01	0,02	0,06	0,38	2,47	12,01	44,01	113,21
21	Herrera	0,10	0,18	0,27	0,64	1,39	2,79	9,59	27,89	68,41	137,89	250,06
22	Higüey	0	0	0	0,001	0,02	0,07	0,55	2,92	14,30	51,34	128,70
23	Hondo Valle	6,34	8,64	10,57	17,12	26,85	40,42	81,85	149,83	261,19	421,78	625,06
24	Jarabacoa	32,82	43,31	51,75	78,31	113,18	156,65	275,42	453,57	685,79	956,02	1259,45
25	Jimaní	1,85	2,62	3,27	5,60	9,33	15,04	35,01	70,55	130,02	232,03	385,97
26	La Castilla	44,21	57,50	67,92	99,72	140,04	189,39	325,57	523,02	768,92	1050,99	1365,88
27	La Descubierta	3,92	5,40	6,66	11,05	17,73	27,46	58,58	110,52	197,71	335,31	520,62
28	La Romana	0	0	0	0	0	0,004	0,07	0,59	3,79	19,05	65,97
29	La Vega	11,18	15,25	18,67	30,58	48,95	75,17	153,47	272,38	451,27	684,33	953,43
30	La Victoria	0,04	0,08	0,13	0,35	0,83	1,80	6,79	21,19	56,45	121,46	227,01
31	Las Américas	0	0	0	0,002	0,01	0,04	0,35	2,35	10,61	37,13	96,22
32	Las Matas de Farfán	17,31	23,03	27,69	42,74	63,29	90,03	167,10	290,37	464,07	678,21	926,71
33	Luperón	0	0	0	0,002	0,02	0,05	0,37	3,11	15,37	54,15	135,48
34	Mao	0,28	0,50	0,73	1,73	3,70	7,23	23,22	61,97	133,62	245,64	414,55
35	Miches	0	0	0	0,001	0,01	0,03	0,21	1,57	8,40	34,94	100,21
36	Moca	3,56	5,15	6,52	11,35	19,08	31,25	76,30	155,68	276,47	456,39	690,04
37	Monción	7,60	10,52	12,99	21,45	34,30	52,88	111,06	202,48	340,60	528,23	754,33
38	Monte Cristi	0	0	0	0,0002	0,01	0,03	0,31	2,62	13,19	46,55	118,02
39	Monte Plata	0,25	0,43	0,60	1,31	2,61	4,87	14,94	41,06	95,60	184,96	324,90
40	Nagua	0,001	0,01	0,01	0,03	0,10	0,27	1,93	9,47	35,11	95,57	199,53
41	Neiba	1,40	2,06	2,64	4,83	8,65	14,88	37,83	80,81	154,44	279,69	463,76
42	Oviedo	0	0	0	0	0	0,01	0,08	0,53	2,91	14,88	56,47
43	Pedernales	0	0	0	0,005	0,02	0,06	0,36	1,88	7,71	28,03	79,26
44	Pepillo Salcedo	0,01	0,01	0,02	0,08	0,24	0,667	3,72	14,71	45,06	106,88	208,36
45	Pimentel	1,81	2,69	3,46	6,25	10,74	17,84	44,91	99,41	189,09	323,81	520,46
46	Polo	0,01	0,03	0,05	0,11	0,27	0,62	2,72	10,89	37,69	97,40	206,82
47	Punta Cana	0	0	0	0	0	0	0,01	0,21	1,74	11,10	48,80
48	Restauración	5,11	7,18	8,92	14,97	24,22	37,82	81,81	153,19	263,32	419,85	617,01
49	Río San Juan	0	0	0,001	0,01	0,03	0,10	0,97	5,62	23,97	74,05	167,86
50	Sabana de la Mar	0,001	0,01	0,01	0,03	0,09	0,24	1,46	6,70	26,35	77,03	168,57

51	Salcedo	2,31	3,47	4,50	8,24	14,32	24,17	62,66	134,96	246,81	416,48	644,05
52	Samaná	0	0	0	0,004	0,01	0,04	0,31	2,17	10,97	42,35	114,31
53	San Cristóbal	0,06	0,11	0,17	0,45	1,03	2,17	7,88	23,82	61,06	127,43	235,23
54	San Francisco de Macorís	0,73	1,21	1,66	3,47	6,71	12,22	35,98	89,14	179,23	317,73	521,55
55	San José de Las Matas	10,66	14,52	17,74	28,80	45,52	69,32	140,84	250,12	413,86	628,74	879,65
56	San José de Ocoa	0,82	1,35	1,82	3,61	6,72	12,03	33,87	77,58	149,30	266,74	447,84
57	San Juan	17,56	23,54	28,43	44,41	66,44	95,13	177,42	309,13	494,80	722,91	987,82
58	San Pedro de Macorís	0	0	0	0,001	0,01	0,03	0,18	1,43	7,89	31,93	88,35
59	San Rafael del Yuma	0	0	0	0,002	0,02	0,08	0,60	3,09	14,88	52,46	130,49
60	Santiago	3,71	5,28	6,61	11,26	18,60	29,99	71,54	146,33	260,65	429,33	653,69
61	Santo Domingo	0,07	0,14	0,21	0,53	1,18	2,42	8,58	25,49	64,16	131,89	241,37
62	Tamayo	1,04	1,57	2,03	3,78	6,88	12,18	32,92	74,02	145,16	267,39	450,51
63	Villa Altagracia	0,70	1,12	1,50	2,95	5,44	9,54	26,69	65,23	132,61	238,89	405,80
64	Yamasá	1,57	2,30	2,93	5,19	8,83	14,62	37,33	84,27	162,58	282,35	463,52
65	Yásica	0,27	0,49	0,72	1,69	3,48	6,70	21,50	59,02	132,58	248,42	424,47

En la tabla 18 se recogen los grados-día de refrigeración (GDR) para el periodo 1998-2015 con  $T_b$  desde 10 °C hasta 22 °C. Para los GDR se tomaron las  $T_b$  más comunes utilizadas que aparecen en la literatura científica. La localidad San Pedro de Macorís (n.º 58 de la tabla) es la que tiene los valores más altos en todas las  $T_b$ , y la localidad La Castilla (n.º 26 de la tabla) es la que tiene los valores más bajos.

Tabla 18. Grados-día de refrigeración 18 años con  $T_b$  de 10 °C a 22 °C.

N.º	LOCALIDAD	TEMPERATURA BASE (°C)											
		10	15	15,5	16	17	18	18,3	20	20,5	21	21,5	22
1	Aeropuerto La Unión	5638,71	3812,60	3629,99	3447,38	3082,15	2716,94	2607,38	1987,21	1805,77	1625,44	1447,28	1272,76
2	Altamira	5434,86	3608,75	3426,14	3243,53	2878,33	2513,30	2403,92	1788,87	1611,53	1437,75	1269,34	1108,67
3	Arroyo Barril	5955,13	4129,02	3946,41	3763,80	3398,58	3033,36	2923,79	2302,97	2120,46	1938,13	1756,29	1575,35
4	Azua	5299,72	3473,61	3291,01	3108,42	2743,35	2379,00	2270,06	1661,44	1488,44	1319,97	1156,97	999,91
5	Baní	5914,40	4088,29	3905,68	3723,07	3357,85	2992,63	2883,06	2262,25	2079,75	1897,49	1715,75	1534,91
6	Barahona	5673,49	3847,38	3664,77	3482,16	3116,94	2751,75	2642,21	2022,37	1840,94	1660,58	1482,17	1306,94
7	Bayaguana	5837,79	4011,68	3829,07	3646,46	3281,23	2916,03	2806,48	2186,41	2004,86	1824,32	1645,48	1469,65
8	Bonao	4766,30	2940,32	2757,91	2575,68	2212,64	1853,54	1747,24	1174,60	1020,80	875,01	737,92	611,44
9	Cabrera	5887,14	4061,03	3878,42	3695,81	3330,59	2965,36	2855,80	2234,99	2052,52	1870,36	1688,87	1508,71
10	Cevicos	5295,16	3469,21	3286,76	3104,41	2740,46	2378,65	2270,85	1673,40	1504,99	1342,04	1186,03	1037,97
11	Constanza	4217,51	2392,78	2211,51	2031,12	1675,04	1332,87	1234,89	733,88	607,12	494,10	396,92	315,03
12	Cotuí	5278,48	3452,42	3269,88	3087,42	2722,95	2360,13	2251,90	1650,98	1481,47	1317,53	1160,62	1011,78
13	Dajabón	5757,22	3931,11	3748,49	3565,88	3200,67	2835,56	2726,09	2108,74	1929,70	1753,18	1580,48	1413,22
14	Duvergé	5518,74	3692,63	3510,02	3327,42	2962,26	2597,34	2488,01	1872,38	1694,43	1519,29	1348,07	1181,86
15	El Cercado	5036,00	3210,00	3027,54	2845,24	2481,70	2121,20	2014,26	1430,37	1268,96	1113,60	965,88	828,47
16	El Seibo	6065,36	4239,25	4056,64	3874,03	3508,80	3143,58	3034,02	2413,17	2230,61	2048,15	1865,97	1684,41
17	Elías Piña	5174,13	3348,24	3165,89	2983,78	2620,91	2261,85	2155,54	1576,23	1415,93	1261,67	1115,15	978,62
18	Enriquillo	5858,54	4032,43	3849,82	3667,21	3301,99	2936,76	2827,20	2206,54	2024,24	1842,30	1661,02	1481,11
19	Gaspar Hernández	5785,12	3959,01	3776,40	3593,79	3228,56	2863,34	2753,78	2133,03	1950,73	1768,94	1588,13	1409,26
20	Hato Mayor	6067,02	4240,91	4058,29	3875,68	3510,46	3145,24	3035,67	2414,85	2232,32	2049,95	1867,98	1686,82
21	Herrera	5760,69	3934,58	3751,97	3569,35	3204,14	2839,01	2729,53	2111,26	1931,16	1752,83	1577,26	1405,91
22	Higüey	6025,41	4199,29	4016,68	3834,07	3468,85	3103,63	2994,06	2373,25	2190,78	2008,52	1826,63	1645,66
23	Hondo Valle	5240,29	3414,29	3231,83	3049,51	2685,83	2324,85	2217,58	1628,49	1463,99	1304,69	1151,80	1007,45
24	Jarabacoa	4269,01	2444,03	2262,57	2081,93	1724,85	1380,05	1280,97	773,44	643,91	526,98	425,48	339,91
25	Jimaní	5601,87	3775,78	3593,20	3410,65	3045,81	2681,94	2573,14	1964,69	1790,41	1619,43	1452,28	1289,76

26	<b>La Castilla</b>	4145,75	2321,48	2140,52	1960,58	1606,28	1268,17	1171,91	682,91	561,10	453,87	362,66	286,10
27	<b>La Descubierta</b>	5372,76	3546,71	3364,17	3181,72	2817,41	2454,90	2346,81	1748,00	1578,81	1413,89	1254,05	1100,61
28	<b>La Romana</b>	6144,21	4318,10	4135,49	3952,88	3587,65	3222,43	3112,86	2491,99	2309,39	2126,83	1944,35	1762,13
29	<b>La Vega</b>	4653,22	2827,24	2644,86	2462,74	2100,23	1742,62	1637,12	1076,17	928,32	789,24	659,90	542,93
30	<b>La Victoria</b>	5785,27	3959,16	3776,55	3593,94	3228,72	2863,54	2754,01	2134,85	1954,03	1774,62	1597,39	1423,80
31	<b>Las Américas</b>	6056,30	4230,19	4047,58	3864,97	3499,75	3134,53	3024,96	2404,13	2221,59	2039,21	1857,23	1675,98
32	<b>Las Matas de Farfán</b>	4768,98	2943,37	2761,32	2579,69	2218,72	1864,51	1760,66	1206,79	1058,12	918,63	790,91	676,68
33	<b>Luperón</b>	5930,47	4104,36	3921,75	3739,13	3373,91	3008,69	2899,12	2278,29	2095,74	1913,39	1731,60	1550,91
34	<b>Mao</b>	5502,33	3676,22	3493,61	3311,00	2945,80	2580,83	2471,49	1857,34	1680,77	1508,10	1341,07	1181,63
35	<b>Miches</b>	6049,00	4222,89	4040,28	3857,67	3492,45	3127,23	3017,66	2396,81	2214,25	2031,77	1849,54	1667,91
36	<b>Moca</b>	5036,71	3210,61	3028,02	2845,50	2481,01	2118,49	2010,52	1415,74	1251,64	1095,56	948,15	809,72
37	<b>Monción</b>	5052,22	3226,19	3043,71	2861,38	2497,92	2138,04	2031,40	1452,88	1295,62	1145,83	1004,17	872,03
38	<b>Monte Cristi</b>	6046,56	4220,45	4037,84	3855,23	3490,00	3124,78	3015,22	2394,37	2211,82	2029,43	1847,51	1666,52
39	<b>Monte Plata</b>	5626,71	3800,60	3617,99	3435,38	3070,19	2705,19	2595,79	1979,35	1800,53	1624,20	1451,81	1285,10
40	<b>Nagua</b>	5806,42	3980,31	3797,70	3615,09	3249,86	2884,64	2775,08	2154,47	1972,34	1790,90	1610,80	1433,23
41	<b>Neiba</b>	5321,12	3495,02	3312,43	3129,85	2764,87	2400,74	2291,83	1683,78	1510,57	1341,50	1177,46	1019,27
42	<b>Oviedo</b>	6084,28	4258,17	4075,56	3892,95	3527,73	3162,51	3052,94	2432,07	2249,48	2066,92	1884,43	1702,15
43	<b>Pedernales</b>	6119,35	4293,24	4110,63	3928,02	3562,80	3197,58	3088,01	2467,19	2284,66	2102,27	1920,16	1738,57
44	<b>Pepillo Salcedo</b>	5893,55	4067,44	3884,83	3702,22	3337,00	2971,78	2862,22	2242,00	2060,39	1879,83	1701,18	1525,60
45	<b>Pimentel</b>	5305,03	3478,92	3296,32	3113,76	2748,90	2385,06	2276,38	1670,65	1498,93	1332,50	1173,06	1021,77
46	<b>Polo</b>	5785,45	3959,34	3776,72	3594,11	3228,89	2863,68	2754,13	2133,85	1951,95	1770,73	1590,87	1413,67
47	<b>Punta Cana</b>	6137,48	4311,37	4128,76	3946,14	3580,92	3215,70	3106,13	2485,26	2302,65	2120,05	1937,48	1755,02
48	<b>Restauración</b>	5349,60	3523,55	3341,01	3158,59	2794,52	2432,93	2325,44	1735,19	1571,51	1413,97	1263,13	1120,12
49	<b>Río San Juan</b>	5842,22	4016,11	3833,50	3650,89	3285,67	2920,45	2810,88	2190,11	2007,72	1825,75	1644,63	1465,17
50	<b>Sabana de la Mar</b>	5918,58	4092,47	3909,86	3727,25	3362,02	2996,80	2887,24	2266,60	2084,37	1902,59	1721,69	1542,62
51	<b>Salcedo</b>	5091,37	3265,26	3082,66	2900,08	2535,28	2171,90	2063,49	1463,31	1296,13	1136,58	985,62	843,66
52	<b>Samaná</b>	5987,89	4161,78	3979,17	3796,56	3431,34	3066,11	2956,55	2335,71	2153,17	1970,76	1788,71	1607,40
53	<b>San Cristóbal</b>	5758,86	3932,75	3750,14	3567,53	3202,30	2837,14	2727,63	2108,81	1928,27	1749,30	1572,72	1400,01
54	<b>San Francisco de Macorís</b>	5260,28	3434,16	3251,55	3068,95	2703,82	2339,22	2230,14	1620,28	1446,82	1278,81	1118,39	966,75
55	<b>San José de Las Matas</b>	4807,52	2981,53	2799,13	2616,98	2254,35	1896,40	1790,69	1224,61	1073,67	930,91	797,20	674,97
56	<b>San José de Ocoa</b>	5298,65	3472,54	3289,94	3107,34	2742,23	2377,69	2268,66	1658,46	1484,54	1315,08	1151,21	993,57
57	<b>San Juan</b>	4636,55	2810,89	2628,81	2447,18	2086,23	1732,34	1628,75	1079,46	933,21	796,53	672,51	563,02
58	<b>San Pedro de Macorís</b>	6169,20	4343,09	4160,47	3977,86	3612,64	3247,42	3137,85	2517,01	2334,44	2151,93	1969,64	1787,96
59	<b>San Rafael del Yuma</b>	6019,72	4193,61	4011,00	3828,39	3463,16	3097,94	2988,37	2367,58	2185,12	2002,88	1821,03	1640,15
60	<b>Santiago</b>	5116,09	3290,00	3107,42	2924,93	2560,51	2198,03	2090,03	1493,86	1328,27	1170,19	1020,52	879,76
61	<b>Santo Domingo</b>	5770,30	3944,19	3761,58	3578,97	3213,75	2848,59	2739,10	2120,50	1940,14	1761,43	1585,26	1413,12
62	<b>Tamayo</b>	5335,21	3509,10	3326,50	3143,92	2778,85	2414,47	2305,43	1695,16	1520,86	1350,68	1185,62	1026,56
63	<b>Villa Altagracia</b>	5449,18	3623,07	3440,46	3257,85	2892,74	2528,10	2418,95	1806,50	1630,49	1458,42	1291,79	1131,74
64	<b>Yamasá</b>	5386,28	3560,17	3377,58	3195,02	2830,11	2466,07	2357,23	1748,67	1575,10	1406,17	1243,44	1087,88
65	<b>Yásica</b>	5391,42	3565,31	3382,70	3200,08	2834,89	2469,91	2360,56	1745,90	1568,85	1395,47	1227,65	1067,77

En la tabla 19 se recogen los grados-día de refrigeración (GDR) para el periodo de años elegido con  $T_b$  desde 22,5 °C hasta 30 °C. La localidad San Pedro de Macorís (n.º 58 de la tabla) es la que tiene los valores más altos en todas las  $T_b$  y la localidad La Castilla (n.º 26 de la tabla) es la que tiene los valores más bajos.

Tabla 19. Grados-día de refrigeración 18 años con  $T_b$  de 22,5 °C a 30 °C.

N.º	LOCALIDAD	TEMPERATURA BASE (°C)												
		22,5	23	23,5	24	24,5	25	25,5	26	26,5	27	27,5	28	30
1	<b>Aeropuerto La Unión</b>	1104,08	943,94	794,08	654,95	527,15	412,93	316,47	239,51	179,39	131,77	93,92	64,77	11,42
2	<b>Altamira</b>	956,96	814,60	682,27	561,70	456,21	367,64	294,66	233,86	182,52	139,32	103,77	75,45	17,67
3	<b>Arroyo Barril</b>	1396,35	1221,08	1052,02	891,99	742,64	604,30	478,23	368,60	279,61	210,06	154,97	111,27	23,15
4	<b>Azua</b>	849,46	707,29	576,61	460,66	360,64	276,12	205,85	149,05	104,76	71,71	48,20	32,24	6,91
5	<b>Baní</b>	1355,80	1179,65	1008,16	843,35	687,09	540,76	406,70	289,14	192,97	120,01	68,70	35,57	0,98
6	<b>Barahona</b>	1136,47	972,63	816,72	670,07	535,49	417,48	318,91	238,71	173,96	122,62	83,31	54,76	7,52
7	<b>Bayaguana</b>	1298,62	1134,52	978,82	831,96	694,60	569,76	461,61	371,53	296,52	233,19	179,56	135,01	36,81
8	<b>Bonao</b>	498,90	402,75	322,00	253,74	195,33	145,79	104,77	72,37	48,14	31,09	19,68	12,15	1,03
9	<b>Cabrera</b>	1331,28	1158,72	993,48	837,98	693,37	560,29	440,78	338,84	257,01	193,14	142,76	103,14	23,60
10	<b>Cevicos</b>	898,57	768,38	648,80	542,83	452,12	375,14	308,68	250,30	199,25	155,49	119,15	90,19	28,92
11	<b>Constanza</b>	245,96	187,36	138,05	97,41	65,20	40,99	24,08	13,19	6,76	3,27	1,48	0,62	0,002
12	<b>Cotuí</b>	871,66	740,81	621,04	515,65	426,18	350,62	285,56	228,68	179,33	137,48	103,31	76,58	22,23
13	<b>Dajabón</b>	1252,85	1100,07	955,57	820,67	697,84	588,64	492,92	409,76	337,66	275,41	221,96	176,23	59,85
14	<b>Duvergé</b>	1021,66	868,78	725,81	596,39	482,80	385,09	302,14	232,74	175,66	130,00	94,50	67,69	15,28
15	<b>El Cercado</b>	703,92	593,09	495,25	409,24	333,73	268,24	212,29	165,35	126,83	95,83	71,39	52,44	13,03
16	<b>El Seibo</b>	1504,10	1326,61	1154,18	989,65	835,03	691,17	559,13	443,12	347,02	269,49	206,06	153,87	36,68
17	<b>Elías Piña</b>	854,10	741,76	640,73	550,20	469,12	396,47	331,78	274,81	225,15	182,28	145,85	115,37	39,16
18	<b>Enriquillo</b>	1303,90	1131,54	966,45	810,21	664,15	530,90	415,90	321,88	245,83	183,24	132,12	91,90	15,63
19	<b>Gaspar Hernández</b>	1234,04	1064,82	904,40	754,62	616,03	489,30	377,24	284,20	211,39	155,21	111,27	77,27	14,18
20	<b>Hato Mayor</b>	1507,30	1331,14	1160,48	997,92	844,86	701,89	571,04	456,64	361,54	283,51	219,09	165,84	45,08
21	<b>Herrera</b>	1240,23	1081,21	929,37	785,46	651,83	532,42	430,02	343,76	270,74	208,82	157,16	115,41	28,58
22	<b>Higüey</b>	1466,71	1291,82	1123,39	963,63	814,05	675,78	552,09	447,06	360,28	287,55	225,22	172,23	46,34
23	<b>Hondo Valle</b>	874,13	753,59	645,45	548,96	463,15	387,01	319,94	261,57	211,34	168,71	133,08	103,76	32,99
24	<b>Jarabacoa</b>	267,98	206,91	155,16	111,92	76,98	50,13	30,76	17,80	9,74	5,04	2,48	1,12	0,013
25	<b>Jimaní</b>	1132,98	984,00	845,80	720,79	608,93	509,51	421,70	344,75	278,56	222,57	176,23	138,51	49,10
26	<b>La Castilla</b>	221,46	166,78	120,97	83,62	54,57	33,29	18,92	10,02	4,97	2,33	1,02	0,43	0,003
27	<b>La Descubierta</b>	955,86	822,58	702,44	594,96	499,47	415,05	340,91	276,86	222,21	176,40	138,64	107,95	35,14
28	<b>La Romana</b>	1580,49	1400,11	1222,52	1050,15	885,85	731,85	588,88	458,94	346,82	256,23	185,04	129,16	19,81
29	<b>La Vega</b>	441,62	356,60	285,24	224,44	172,35	128,31	92,16	63,75	42,66	27,75	17,57	10,79	0,96
30	<b>La Victoria</b>	1255,46	1093,83	939,69	793,62	657,14	533,95	427,61	338,69	264,39	202,16	150,63	109,07	24,77
31	<b>Las Américas</b>	1496,17	1319,02	1146,34	980,32	822,63	674,19	536,28	412,83	308,60	224,49	158,02	106,81	15,57
32	<b>Las Matas de Farfán</b>	575,18	485,16	405,16	334,08	271,60	217,36	171,20	132,69	101,30	76,25	56,63	41,51	10,43
33	<b>Luperón</b>	1372,41	1197,94	1030,06	871,51	723,86	587,62	463,90	355,62	266,83	197,65	144,50	103,39	20,16
34	<b>Mao</b>	1030,51	888,06	755,33	634,86	529,22	438,55	361,04	294,49	237,08	187,78	145,81	110,90	30,80
35	<b>Miches</b>	1487,42	1309,51	1136,39	970,83	815,38	670,88	538,05	420,30	322,23	244,48	182,80	133,48	28,90
36	<b>Moca</b>	681,32	565,28	464,61	379,99	309,02	248,42	196,04	151,18	113,73	83,50	60,18	42,86	9,42
37	<b>Monción</b>	751,87	644,93	550,63	467,34	393,63	328,22	270,24	219,30	175,01	137,15	105,62	79,98	23,55
38	<b>Monte Cristi</b>	1487,46	1311,86	1141,85	980,00	827,87	686,25	556,08	439,70	340,31	259,02	194,25	143,19	33,09
39	<b>Monte Plata</b>	1125,73	974,42	831,74	698,56	577,77	473,27	386,00	312,65	249,71	195,37	149,30	111,47	30,74
40	<b>Nagua</b>	1260,12	1093,64	936,13	788,88	652,20	527,61	418,90	329,20	257,38	198,90	150,84	111,92	29,16

41	<b>Neiba</b>	868,41	727,67	600,21	487,70	390,07	306,55	236,46	178,84	132,71	96,89	69,96	50,25	11,95
42	<b>Oviedo</b>	1520,26	1339,31	1160,46	986,05	819,22	662,42	517,36	386,79	276,87	191,48	127,42	80,09	6,49
43	<b>Pedernales</b>	1557,92	1379,17	1203,86	1034,27	872,51	720,28	580,09	456,97	354,30	270,51	202,31	147,35	29,35
44	<b>Pepillo Salcedo</b>	1354,77	1190,72	1034,68	887,32	749,53	623,58	511,90	415,41	333,48	264,64	207,19	159,39	45,45
45	<b>Pimentel</b>	879,39	746,23	623,89	515,73	423,96	347,15	281,67	224,79	175,59	134,02	100,14	73,72	20,47
46	<b>Polo</b>	1241,07	1075,25	917,71	769,73	633,52	513,93	414,08	331,49	261,73	202,17	152,19	111,68	25,93
47	<b>Punta Cana</b>	1572,83	1391,32	1211,47	1035,47	866,57	707,95	561,43	427,84	310,33	214,37	142,41	90,27	6,97
48	<b>Restauración</b>	986,82	865,03	755,13	656,34	567,72	488,28	416,96	353,09	296,19	245,80	201,60	163,31	63,04
49	<b>Río San Juan</b>	1288,99	1118,30	955,67	803,16	661,62	531,75	416,04	318,64	241,21	180,64	132,71	95,09	20,98
50	<b>Sabana de la Mar</b>	1367,02	1197,04	1035,01	882,50	739,93	608,82	493,15	396,16	316,61	250,33	194,62	148,39	43,37
51	<b>Salcedo</b>	711,23	590,29	484,17	394,73	320,21	257,09	202,77	156,24	117,36	85,93	61,63	43,63	9,32
52	<b>Samaná</b>	1427,61	1250,97	1079,87	917,13	764,94	623,87	494,75	381,16	287,81	215,04	157,96	112,98	22,73
53	<b>San Cristóbal</b>	1232,70	1072,03	918,63	773,18	637,58	515,76	411,05	323,46	250,23	189,07	138,87	99,04	21,14
54	<b>San Francisco de Macorís</b>	824,35	691,62	570,52	464,90	376,62	303,49	241,65	188,69	143,77	106,72	77,45	55,26	12,66
55	<b>San José de Las Matas</b>	566,89	473,49	392,95	323,14	262,15	208,84	162,77	123,76	91,63	66,20	46,80	32,54	6,01
56	<b>San José de Ocoa</b>	842,68	700,07	568,72	452,28	352,22	268,16	198,65	142,54	98,92	66,47	43,52	28,17	4,94
57	<b>San Juan</b>	467,19	383,46	310,11	246,35	191,77	146,04	108,79	79,36	56,79	40,08	28,01	19,32	3,67
58	<b>San Pedro de Macorís</b>	1607,41	1429,20	1255,25	1088,02	929,10	779,21	639,69	514,32	407,04	318,09	244,83	185,19	54,56
59	<b>San Rafael del Yuma</b>	1461,35	1286,71	1118,56	959,07	809,77	671,88	548,83	444,44	358,07	285,54	223,33	170,45	45,49
60	<b>Santiago</b>	748,65	628,85	522,90	432,31	356,15	291,45	235,48	186,98	145,48	110,88	83,03	61,48	16,74
61	<b>Santo Domingo</b>	1246,52	1086,57	933,87	789,07	654,24	533,34	429,44	342,14	268,54	206,37	154,67	112,96	27,08
62	<b>Tamayo</b>	874,69	732,48	603,30	489,49	391,16	307,38	237,09	179,08	132,47	96,13	68,75	48,70	10,68
63	<b>Villa Altagracia</b>	978,91	833,90	698,18	574,96	467,48	376,65	300,05	235,02	179,90	133,90	96,80	68,26	14,66
64	<b>Yamasá</b>	940,18	800,97	671,69	555,51	455,51	371,47	300,26	238,86	185,85	140,90	104,11	75,38	18,92
65	<b>Yásica</b>	917,12	776,11	645,37	526,73	423,47	337,56	267,56	209,65	161,10	120,73	88,15	62,97	14,10

## 4.7. Resultados de las zonas climáticas

En esta sección se recogen las zonas climáticas que corresponderían a la R. D. según el Código Técnico de la Edificación de 2009 de obligado cumplimiento en territorio español. Además, se presenta una propuesta de nomenclatura para las zonas climáticas de la R. D. obtenidas del trabajo de esta tesis más acorde con las características climáticas de La Hispaniola. A tenor, de que la zona occidental de esta isla es territorio haitiano, estos resultados son en cuanto al número de zonas climáticas extrapolables a Haití.

### 4.7.1. Zonas climáticas que corresponderían a la R. D. según el Código Técnico de la Edificación (CTE-09)

La tabla 20 recoge las zonas climáticas obtenidas aplicando la metodología del Código Técnico de la Edificación (CTE-09) a la R. D. En esta tabla se observa que para el periodo invernal (diciembre, enero y febrero) todo el país tiene solamente una severidad climática, que se corresponde con el tipo A.

En lo que se refiere al verano (junio, julio, agosto y septiembre) el país presenta una mayor diversificación en cuanto a la severidad climática. Esto es, los cálculos ponen de manifiesto la existencia de tres severidades climáticas de verano, que se corresponden, según los lugares, con los tipos 2, 3 y 4 respectivamente.

Tabla 20. Zonas climáticas según el CTE-09.

N.º	LOCALIDAD	PROVINCIA	ALTITUD (m s. n. m.)	Zona Climática	
				A	
1	Aeropuerto La Unión	Puerto Plata	35	A	4
2	Altamira	Puerto Plata	430	A	4
3	Arroyo Barril	Samaná	193	A	4
4	Azua	Azua	91	A	4
5	Baní	Peravia	38	A	4
6	Barahona	Barahona	48	A	4
7	Bayaguana	Monte Plata	43	A	4
8	Bonao	Monseñor Nouel	184	A	3
9	Cabrera	María Trinidad Sánchez	83	A	4
10	Cevicos	Sánchez Ramírez	84	A	4
11	Constanza	La Vega	1228	A	2
12	Cotuí	Sánchez Ramírez	57	A	4
13	Dajabón	Dajabón	45	A	4
14	Duvergé	Independencia	33	A	4
15	El Cercado	San Juan	891	A	4
16	El Seibo	El Seibo	115	A	4
17	Elías Piña	Elías Piña	539	A	4
18	Enriquillo	Barahona	0	A	4
19	Gaspar Hernández	Espailat	61	A	4
20	Hato Mayor	Hato Mayor	86	A	4
21	Herrera	Santo Domingo	41	A	4
22	Higüey	La Altagracia	93	A	4
23	Hondo Valle	Elías Piña	1197	A	4
24	Jarabacoa	La Vega	531	A	2
25	Jimaní	Independencia	57	A	4
26	La Castilla	La Vega	1127	A	2
27	La Descubierta	Independencia	208	A	4
28	La Romana	La Romana	26	A	4
29	La Vega	La Vega	143	A	3
30	La Victoria	Santo Domingo	11	A	4
31	Las Américas	Santo Domingo	15	A	4
32	Las Matas de Farfán	San Juan	472	A	3
33	Luperón	Puerto Plata	14	A	4
34	Mao	Valverde	64	A	4
35	Miches	El Seibo	49	A	4
36	Moca	Espailat	171	A	4
37	Monción	Santiago Rodríguez	320	A	4
38	Monte Cristi	Monte Cristi	23	A	4

39	Monte Plata	Monte Plata	66	A	4
40	Nagua	María Trinidad Sánchez	35	A	4
41	Neiba	Bahoruco	-18	A	4
42	Oviedo	Pedernales	17	A	4
43	Pedernales	Pedernales	67	A	4
44	Pepillo Salcedo	Monte Cristi	5	A	4
45	Pimentel	Duarte	32	A	4
46	Polo	Barahona	916	A	4
47	Punta Cana	La Altagracia	18	A	4
48	Restauración	Dajabón	643	A	4
49	Río San Juan	María Trinidad Sánchez	57	A	4
50	Sabana de la Mar	Hato Mayor	19	A	4
51	Salcedo	Hermanas Mirabal	180	A	4
52	Samaná	Samaná	95	A	4
53	San Cristóbal	San Cristóbal	55	A	4
54	San Francisco de Macorís	Duarte	116	A	4
55	San José de Las Matas	Santiago	491	A	3
56	San José de Ocoa	San José de Ocoa	495	A	4
57	San Juan	San Juan	417	A	3
58	San Pedro de Macorís	San Pedro de Macorís	11	A	4
59	San Rafael del Yuma	La Altagracia	51	A	4
60	Santiago	Santiago	168	A	4
61	Santo Domingo	Distrito Nacional	34	A	4
62	Tamayo	Bahoruco	15	A	4
63	Villa Altagracia	San Cristóbal	184	A	4
64	Yamasá	Monte Plata	83	A	4
65	Yásica	Puerto Plata	224	A	4

#### 4.7.2. Propuesta de nomenclatura para las zonas climáticas obtenidas

En la tabla 21 se recoge la temperatura de bulbo seco media mensual correspondiente al periodo 1998-2015, así como la temperatura media anual. La más baja de 19,49 °C corresponde al mes de enero y a la localidad La Castilla (n.º 26 de la tabla). A esta localidad que se encuentra ubicada a 1127 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) también le corresponde la temperatura de bulbo seco media anual más baja con un valor de 21,34 °C.

En lo que se refiere la temperatura de bulbo seco media mensual el valor más elevado de 28,08 °C corresponde al mes de agosto y a la localidad Monte Cristi (n.º 38 de la tabla). Esta población se encuentra ubicada a 23 msnm. Ahora bien, la temperatura de bulbo seco media anual más alta le corresponde a San Pedro de Macorís (n.º 58 de la tabla) con un valor de 26,89 °C.

La citada tabla también pone de manifiesto que todo el país carece de un invierno propiamente dicho ya que la temperatura media mensual de todos los observatorios y meses es >18 °C (90) (91) (92) (93), es decir, el año entero es verano. Por esta razón se asignó a todo el país una severidad climática: severidad



climática de verano (SCV). Ahora bien, como se ha indicado en el punto anterior, durante el periodo astronómicamente veraniego y según el CTE-09 se tienen tres severidades, que se corresponden con los tipos 2, 3 y 4 respectivamente. Por otra parte en la misma tabla 21 se observa un periodo más cálido que se extiende desde abril a octubre, lo que también es indicativo de que la SCV necesita matizarse.

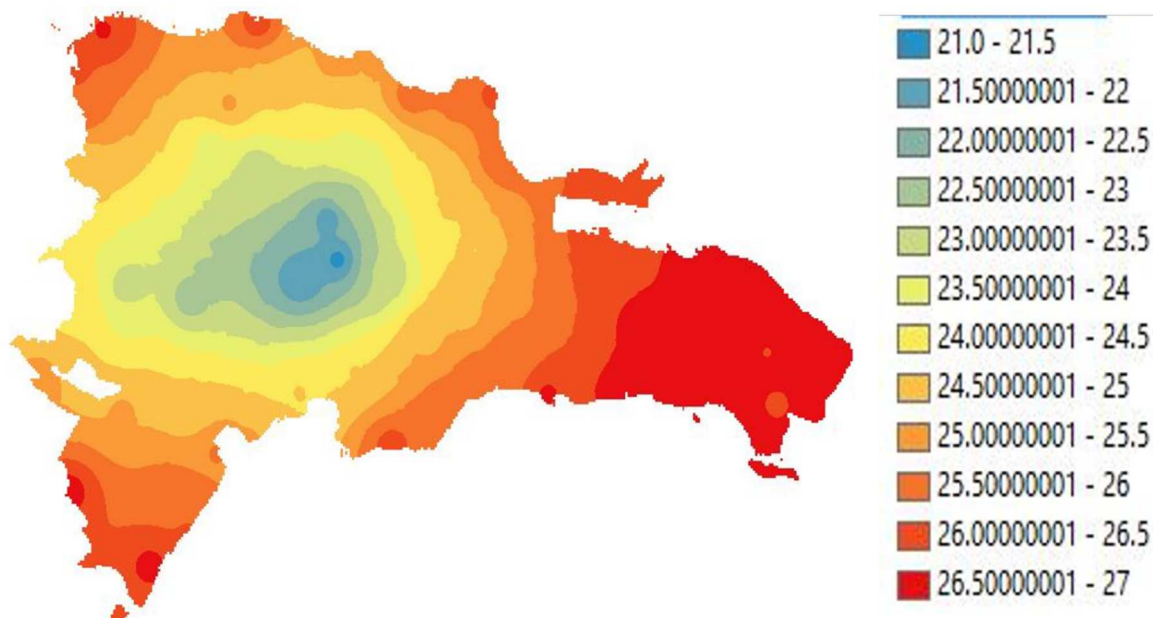
Tabla 21. Temperatura ambiente promedio mensual de cada observatorio.

<b>Temperatura ambiente media (°C)</b>														Promedio
N.º	Localidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	anual
Aeropuerto														
1	La Unión	23,71	23,72	24,21	25,02	25,75	26,40	26,53	26,86	26,89	26,49	25,29	24,31	25,43
2	Altamira	22,97	23,11	23,77	24,64	25,34	25,96	26,04	26,37	26,36	25,87	24,53	23,52	24,87
3	Arroyo Barril	24,76	24,93	25,45	26,17	26,66	27,00	27,15	27,41	27,46	27,13	26,20	25,27	26,30
4	Azua	22,67	23,05	24,03	24,87	25,11	25,09	25,20	25,55	25,78	25,41	24,27	23,04	24,51
5	Baní	24,69	24,80	25,29	26,01	26,53	26,83	26,95	27,25	27,39	27,13	26,19	25,20	26,19
6	Barahona	24,02	24,36	25,07	25,81	25,97	25,93	26,13	26,48	26,58	26,28	25,41	24,33	25,53
7	Bayaguana	24,40	24,85	25,54	26,27	26,51	26,58	26,70	26,94	26,98	26,65	25,64	24,69	25,98
8	Bonao	21,21	21,40	22,11	23,04	23,61	23,93	24,05	24,35	24,40	23,98	22,77	21,67	23,04
9	Cabrera	24,50	24,54	25,12	25,87	26,43	26,88	27,07	27,35	27,38	27,04	26,06	25,10	26,11
10	Cevicos	22,63	22,83	23,53	24,56	25,09	25,43	25,60	25,84	25,69	25,31	24,19	23,18	24,49
11	Constanza	19,67	19,78	20,45	21,37	22,09	22,51	22,62	22,96	23,06	22,59	21,27	20,12	21,54
12	Cotuí	22,61	22,81	23,50	24,50	25,03	25,36	25,52	25,77	25,66	25,28	24,16	23,15	24,45
13	Dajabón	23,66	24,27	25,03	25,74	26,36	26,93	27,05	27,35	27,19	26,47	25,00	24,05	25,76
14	Duvergé	23,49	24,07	25,03	25,76	25,66	25,37	25,64	26,06	26,15	25,72	24,76	23,58	25,11
15	El Cercado	21,88	22,57	23,67	24,42	24,43	24,29	24,61	25,05	25,03	24,38	23,12	21,96	23,78
16	El Seibo	25,25	25,58	26,09	26,71	27,02	27,16	27,29	27,52	27,58	27,25	26,34	25,46	26,60
17	Elías Piña	22,19	23,07	24,18	24,89	24,88	24,82	25,25	25,61	25,28	24,48	23,16	22,14	24,16
18	Enriquillo	24,69	24,97	25,50	26,24	26,41	26,41	26,61	26,92	26,93	26,70	26,00	25,05	26,04
Gaspar														
19	Hernández	24,18	24,19	24,71	25,48	26,12	26,69	26,86	27,17	27,20	26,83	25,76	24,80	25,83
20	Hato Mayor	25,20	25,69	26,30	26,88	27,07	27,11	27,21	27,45	27,53	27,21	26,27	25,37	26,61
21	Herrera	24,09	24,53	25,30	26,13	26,35	26,38	26,49	26,74	26,82	26,49	25,44	24,45	25,77
22	Higüey	25,35	25,59	26,04	26,67	26,91	27,01	27,15	27,34	27,33	27,00	26,15	25,37	26,49
23	Hondo Valle	22,43	23,31	24,43	25,14	25,04	24,88	25,28	25,67	25,43	24,70	23,45	22,37	24,34
24	Jarabacoa	19,81	19,90	20,54	21,47	22,22	22,69	22,79	23,12	23,19	22,73	21,41	20,28	21,68
25	Jimaní	23,59	24,61	25,72	26,40	26,03	25,59	26,00	26,40	26,19	25,60	24,51	23,40	25,34
26	La Castilla	19,49	19,56	20,18	21,11	21,88	22,34	22,45	22,79	22,87	22,41	21,09	19,95	21,34
La														
27	Descubierta	22,86	23,81	24,94	25,64	25,41	25,09	25,48	25,89	25,70	25,05	23,87	22,74	24,71
28	La Romana	25,61	25,88	26,28	26,84	27,17	27,34	27,46	27,69	27,76	27,47	26,60	25,75	26,82
29	La Vega	20,85	20,96	21,63	22,56	23,27	23,76	23,86	24,18	24,19	23,73	22,44	21,36	22,73
30	La Victoria	24,20	24,60	25,31	26,11	26,38	26,46	26,58	26,83	26,89	26,57	25,53	24,56	25,84
31	Las Américas	25,16	25,53	26,05	26,67	26,98	27,12	27,23	27,49	27,60	27,32	26,36	25,43	26,58
Las Matas de														
32	Farfán	21,04	21,67	22,78	23,55	23,71	23,71	24,02	24,47	24,42	23,70	22,33	21,21	23,05
33	Luperón	24,54	24,58	24,99	25,75	26,52	27,21	27,33	27,67	27,72	27,28	26,08	25,12	26,23
34	Mao	23,02	23,30	24,08	24,95	25,62	26,18	26,28	26,63	26,59	25,98	24,54	23,53	25,06

35	Miches	25,10	25,34	25,85	26,52	26,94	27,19	27,33	27,58	27,64	27,32	26,40	25,49	26,56
36	Moca	21,85	22,00	22,74	23,67	24,33	24,85	24,94	25,25	25,22	24,75	23,43	22,38	23,78
37	Monción	21,62	22,03	23,03	23,94	24,52	24,95	25,07	25,46	25,41	24,69	23,13	22,07	23,83
38	Monte Cristi	24,72	24,94	25,42	26,13	26,90	27,64	27,75	28,08	28,04	27,49	26,21	25,26	26,55
39	Monte Plata	23,70	24,05	24,76	25,62	25,97	26,13	26,27	26,51	26,49	26,13	25,08	24,11	25,40
40	Nagua	24,24	24,35	24,98	25,78	26,29	26,67	26,84	27,11	27,12	26,76	25,77	24,81	25,89
41	Neiba	22,85	23,46	24,54	25,28	25,15	24,83	25,09	25,55	25,71	25,24	24,18	22,91	24,57
42	Oviedo	25,44	25,51	25,85	26,55	26,93	27,10	27,27	27,56	27,60	27,39	26,76	25,88	26,65
43	Pedernales	25,48	25,74	26,26	27,01	27,12	27,05	27,34	27,69	27,64	27,30	26,63	25,74	26,75
44	Pepillo Salcedo	24,15	24,62	25,25	25,93	26,61	27,26	27,39	27,70	27,58	26,92	25,54	24,60	26,13
45	Pimentel	22,69	22,86	23,55	24,52	25,07	25,44	25,60	25,86	25,77	25,38	24,25	23,24	24,52
46	Polo	24,47	24,82	25,43	26,18	26,25	26,17	26,38	26,68	26,67	26,44	25,75	24,79	25,84
47	Punta Cana	25,60	25,60	25,86	26,46	27,02	27,44	27,60	27,85	27,89	27,60	26,76	25,92	26,80
48	Restauración	22,44	23,27	24,27	25,00	25,39	25,74	25,98	26,29	25,98	25,12	23,58	22,64	24,64
49	Río San Juan	24,36	24,39	24,97	25,73	26,31	26,78	26,97	27,26	27,28	26,93	25,93	24,97	25,99
50	Sabana de la Mar	24,62	24,96	25,63	26,36	26,68	26,84	26,96	27,19	27,24	26,89	25,97	25,06	26,20
51	Salcedo	22,04	22,18	22,90	23,82	24,46	24,95	25,06	25,36	25,34	24,88	23,61	22,58	23,93
52	Samaná	24,88	25,05	25,54	26,25	26,74	27,08	27,23	27,49	27,54	27,22	26,29	25,37	26,39
53	San Cristóbal	24,10	24,48	25,22	26,04	26,32	26,39	26,51	26,76	26,85	26,52	25,48	24,49	25,76
54	San Francisco de Macorís	22,58	22,72	23,41	24,31	24,90	25,32	25,46	25,75	25,72	25,31	24,14	23,13	24,40
55	San José de Las Matas	21,10	21,36	22,22	23,14	23,77	24,23	24,34	24,71	24,69	24,10	22,64	21,57	23,16
56	San José de Ocoa	22,70	23,04	23,94	24,78	25,08	25,12	25,23	25,57	25,77	25,41	24,28	23,10	24,50
57	San Juan	20,72	21,18	22,23	23,04	23,31	23,34	23,57	24,04	24,15	23,52	22,18	21,00	22,69
58	San Pedro de Macorís	25,57	26,25	26,85	27,30	27,35	27,27	27,35	27,60	27,73	27,44	26,45	25,53	26,89
59	San Rafael del Yuma	25,34	25,58	26,02	26,66	26,90	27,00	27,14	27,32	27,30	26,98	26,14	25,37	26,48
60	Santiago	22,00	22,17	22,95	23,89	24,56	25,14	25,21	25,52	25,47	24,97	23,57	22,54	24,00
61	Santo Domingo	24,13	24,56	25,31	26,13	26,37	26,41	26,52	26,77	26,85	26,52	25,48	24,49	25,79
62	Tamayo	22,90	23,46	24,49	25,23	25,17	24,92	25,15	25,59	25,74	25,30	24,26	23,03	24,60
63	Villa Altagracia	23,16	23,51	24,29	25,18	25,51	25,62	25,74	26,01	26,07	25,71	24,61	23,57	24,91
64	Yamasá	22,95	23,24	23,98	24,93	25,34	25,54	25,68	25,94	25,91	25,55	24,44	23,41	24,74
65	Yásica	22,90	22,98	23,63	24,49	25,19	25,81	25,91	26,23	26,21	25,76	24,47	23,47	24,75
	Promedio Nacional	23,40	23,73	24,43	25,22	25,60	25,83	25,99	26,30	26,31	25,87	24,76	23,75	25,10

A mayor abundancia, tomando como referencia la temperatura de bulbo seco media anual de cada observatorio se elaboró el mapa de la figura 13, en el que se observa la diferencia de temperaturas medias anuales en el territorio de la R. D.

Figura 13. Mapa de temperatura bulbo seco media anual, °C. (1998-2015).



Como consecuencia de lo dicho, dentro de la SCV, se tomaron dos periodos. Uno de abril a octubre ("verano" cálido) y otro de noviembre a marzo ("verano" menos cálido). A partir de ellos se determinó el índice de severidad climática de verano (ISCV) de cada observatorio y para cada periodo, como se observa en la tabla 22.

Los resultados obtenidos indican que los índices de severidad climática se encuentran comprendidos en el intervalo [0,31-1,78], lo que demuestra que es necesario dividir el territorio de la R. D. tomando en cuenta esas matizaciones.

En consecuencia, la SCV asignada en primer lugar a la R. D. se subdividió en severidad climática abril-octubre (SCAO) y severidad climática noviembre-marzo (SCLiNM). A su vez divididas en otras dos como se muestra la tabla siguiente, "V" de verano.

Tabla 22. Nueva severidad climática propuesta.

<b>Severidad climática de verano (SCV)</b>			
<b>SCLiNM</b>		<b>SCAO</b>	
<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>
ISCLiNM ≤ 0,6	0,6 < ISCLiNM ≤ 0,9	0,9 < ISCAO ≤ 1,25	ISCAO > 1,25

Combinando las dos severidades noviembre-marzo y las dos abril-octubre se obtienen 16 zonas climáticas distintas. Las zonas que en lo adelante se utilizarán son consecuencia de la combinación de los índices SCLiNM y SCAO.

La tabla 23 presenta las localidades con detalles de los valores promedios por severidad climática: severidad climática noviembre-marzo (SCLiNM), severidad

climática abril-octubre (SCAO), índice de severidad climática noviembre-marzo (ISCLiNM), índice de severidad climática abril-octubre (ISCAO), media de temperatura noviembre-marzo (MTNM), media radiación global acumulada noviembre-marzo (MRGANM), media de temperatura abril-octubre (MTAO), media radiación global acumulada abril-octubre (MRGAAO).

Tabla 23. Promedios por severidad climática para cada localidad.

N.º	Localidad	Altitud (m s. n. m.)	SCLiNM	SCAO	ISCLiNM	ISCAO	MTNM (°C)	MRGANM (kWh/m <sup>2</sup> )	MTAO (°C)	MRGAAO (kWh/m <sup>2</sup> )
1	Aeropuerto La Unión	35	V3	V4	1,18	1,60	24,25	143,88	26,28	190,06
2	Altamira	430	V3	V4	1,02	1,53	23,58	134,30	25,80	177,07
3	Arroyo Barril	193	V4	V4	1,42	1,72	25,32	144,64	27,00	181,41
4	Azua	91	V3	V4	1,02	1,43	23,41	158,47	25,29	189,87
5	Baní	38	V4	V4	1,41	1,69	25,23	158,39	26,87	189,62
6	Barahona	48	V4	V4	1,28	1,58	24,64	162,20	26,17	192,67
7	Bayaguana	43	V4	V4	1,36	1,68	25,02	140,92	26,66	167,25
8	Bonao	184	V2	V3	0,64	1,15	21,83	138,94	23,91	174,21
9	Cabrera	83	V4	V4	1,37	1,69	25,06	145,08	26,86	189,75
10	Cevicos	84	V3	V4	0,98	1,45	23,27	139,77	25,36	171,14
11	Constanza	1228	V1	V2	0,36	0,82	20,26	149,03	22,46	178,97
12	Cotuí	57	V3	V4	0,97	1,44	23,24	139,35	25,30	174,47
13	Dajabón	45	V3	V4	1,23	1,67	24,40	149,05	26,73	186,80
14	Duvergé	33	V3	V4	1,19	1,51	24,19	163,59	25,77	194,41
15	El Cercado	891	V2	V4	0,87	1,30	22,64	154,04	24,60	185,61
16	El Seibo	115	V4	V4	1,51	1,76	25,74	145,77	27,22	175,25
17	Elías Piña	539	V3	V4	0,97	1,38	22,95	161,22	25,03	189,16
18	Enriquillo	0	V4	V4	1,41	1,65	25,24	157,36	26,60	187,42
19	Gaspar Hernández	61	V4	V4	1,29	1,66	24,73	140,26	26,62	183,94
20	Hato Mayor	86	V4	V4	1,51	1,76	25,77	141,83	27,21	168,56
21	Herrera	41	V4	V4	1,31	1,64	24,76	150,29	26,49	180,30
22	Higüey	93	V4	V4	1,50	1,73	25,70	143,12	27,06	174,56
23	Hondo Valle	1197	V3	V4	0,99	1,41	23,20	142,65	25,16	174,36
24	Jarabacoa	531	V1	V2	0,37	0,86	20,39	143,50	22,60	184,63
25	Jimaní	57	V3	V4	1,25	1,56	24,37	165,02	26,03	193,15
26	La Castilla	1127	V1	V2	0,31	0,78	20,06	141,21	22,26	180,80
27	La Descubierta	208	V3	V4	1,09	1,46	23,65	156,66	25,47	188,28
28	La Romana	26	V4	V4	1,56	1,78	26,02	145,52	27,39	177,42
29	La Vega	143	V1	V3	0,56	1,10	21,45	143,69	23,65	185,81
30	La Victoria	11	V4	V4	1,32	1,66	24,84	144,84	26,55	172,02
31	Las Américas	15	V4	V4	1,50	1,75	25,71	147,20	27,20	180,27
32	Las Matas de Farfán	472	V2	V3	0,73	1,17	21,81	165,50	23,94	192,60
33	Luperón	14	V4	V4	1,37	1,71	25,06	148,61	27,07	197,44
34	Mao	64	V3	V4	1,07	1,56	23,69	152,57	26,03	193,64
35	Miches	49	V4	V4	1,49	1,75	25,64	142,00	27,22	176,26
36	Moca	171	V2	V4	0,77	1,32	22,48	139,44	24,71	181,78
37	Monción	320	V2	V4	0,79	1,35	22,38	147,82	24,86	182,35

38	Monte Cristi	23	V4	V4	1,42	1,76	25,31	154,66	27,43	198,58
39	Monte Plata	66	V3	V4	1,21	1,59	24,34	139,97	26,16	168,08
40	Nagua	35	V4	V4	1,32	1,66	24,83	145,71	26,65	184,96
41	Neiba	-18	V3	V4	1,07	1,42	23,59	163,19	25,26	194,77
42	Oviedo	17	V4	V4	1,53	1,73	25,89	162,22	27,20	192,87
43	Pedernales	67	V4	V4	1,55	1,75	25,97	156,85	27,31	188,22
44	Pepillo Salcedo	5	V4	V4	1,32	1,71	24,83	152,81	27,06	193,61
45	Pimentel	32	V3	V4	0,98	1,45	23,32	138,68	25,38	175,93
46	Polo	916	V4	V4	1,37	1,62	25,05	150,44	26,40	185,16
47	Punta Cana	18	V4	V4	1,55	1,76	25,95	155,53	27,41	191,43
48	Restauración	643	V3	V4	1,00	1,50	23,24	152,23	25,64	186,66
49	Río San Juan	57	V4	V4	1,34	1,67	24,92	143,96	26,75	189,19
50	Sabana de la Mar	19	V4	V4	1,41	1,70	25,25	149,57	26,88	181,22
51	Salcedo	180	V2	V4	0,81	1,34	22,66	135,55	24,84	178,20
52	Samaná	95	V4	V4	1,45	1,73	25,43	145,12	27,08	183,48
53	San Cristóbal	55	V4	V4	1,31	1,64	24,76	150,11	26,48	181,13
54	San Francisco de Macorís	116	V3	V4	0,93	1,42	23,20	136,71	25,25	177,51
55	San José de Las Matas	491	V2	V3	0,65	1,20	21,78	146,95	24,14	184,21
56	San José de Ocoa	495	V3	V4	1,00	1,43	23,41	147,80	25,28	176,70
57	San Juan	417	V2	V3	0,64	1,08	21,46	163,55	23,57	191,20
58	San Pedro de Macorís	11	V4	V4	1,58	1,78	26,13	145,65	27,43	178,90
59	San Rafael del Yuma	51	V4	V4	1,50	1,72	25,69	148,95	27,04	183,92
60	Santiago	168	V2	V4	0,82	1,37	22,65	145,42	24,97	187,85
61	Santo Domingo	34	V4	V4	1,31	1,65	24,79	146,88	26,51	176,52
62	Tamayo	15	V3	V4	1,07	1,43	23,63	163,93	25,30	196,50
63	Villa Altagracia	184	V3	V4	1,09	1,51	23,83	135,15	25,69	166,23
64	Yamasá	83	V3	V4	1,04	1,48	23,60	139,69	25,55	170,57
65	Yásica	224	V3	V4	1,00	1,50	23,49	135,56	25,66	182,10

En las tablas y figuras siguientes quedan mostradas las localidades con las nuevas zonas climáticas.

En la tabla 24 quedan recogidas las localidades a las que corresponde una zona de severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año.

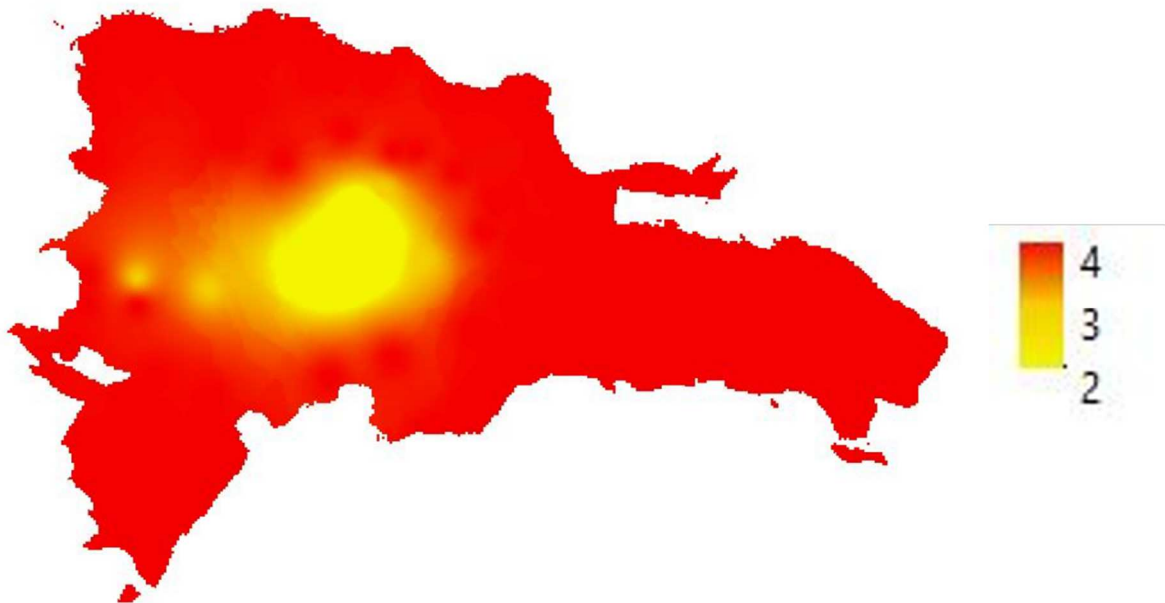
Tabla 24. Zonas de severidad climática SCAO todo el año.

<b>N.º</b>	<b>Localidad</b>	<b>Noviembre-marzo (SCLiNM)</b>	<b>Abril-octubre (SCAO)</b>
1	Aeropuerto La Unión	V3	V4
2	Altamira	V3	V4
3	Arroyo Barril	V4	V4
4	Azua	V3	V4
5	Baní	V4	V4
6	Barahona	V4	V4
7	Bayaguana	V4	V4
8	Cabrera	V4	V4
9	Cevicos	V3	V4
10	Cotuí	V3	V4
11	Dajabón	V3	V4
12	Duvergé	V3	V4
13	El Seibo	V4	V4
14	Elías Piña	V3	V4
15	Enriquillo	V4	V4
16	Gaspar Hernández	V4	V4
17	Hato Mayor	V4	V4
18	Herrera	V4	V4
19	Higüey	V4	V4
20	Hondo Valle	V3	V4
21	Jimaní	V3	V4
22	La Descubierta	V3	V4
23	La Romana	V4	V4
24	La Victoria	V4	V4
25	Las Américas	V4	V4
26	Luperón	V4	V4
27	Mao	V3	V4
28	Miches	V4	V4
29	Monte Cristi	V4	V4
30	Monte Plata	V3	V4
31	Nagua	V4	V4
32	Neiba	V3	V4
33	Oviedo	V4	V4
34	Pedernales	V4	V4
35	Pepillo Salcedo	V4	V4
36	Pimentel	V3	V4
37	Polo	V4	V4
38	Punta Cana	V4	V4

39	Restauración	V3	V4
40	Río San Juan	V4	V4
41	Sabana de la Mar	V4	V4
42	Samaná	V4	V4
43	San Cristóbal	V4	V4
44	San Francisco de Macorís	V3	V4
45	San José de Ocoa	V3	V4
46	San Pedro de Macorís	V4	V4
47	San Rafael del Yuma	V4	V4
48	Santo Domingo	V4	V4
49	Tamayo	V3	V4
50	Villa Altagracia	V3	V4
51	Yamasá	V3	V4
52	Yásica	V3	V4

En la figura 14 se puede ver mejor que la mayor parte del país se encuentra con una severidad V4.

Figura 14. Mapa severidad climática abril-octubre (SCAO).



En la tabla 25 se presentan las localidades que tienen zonas de severidades climáticas diferenciadas a lo largo del año .

Tabla 25. Zonas de severidad con severidad climática diferenciada.

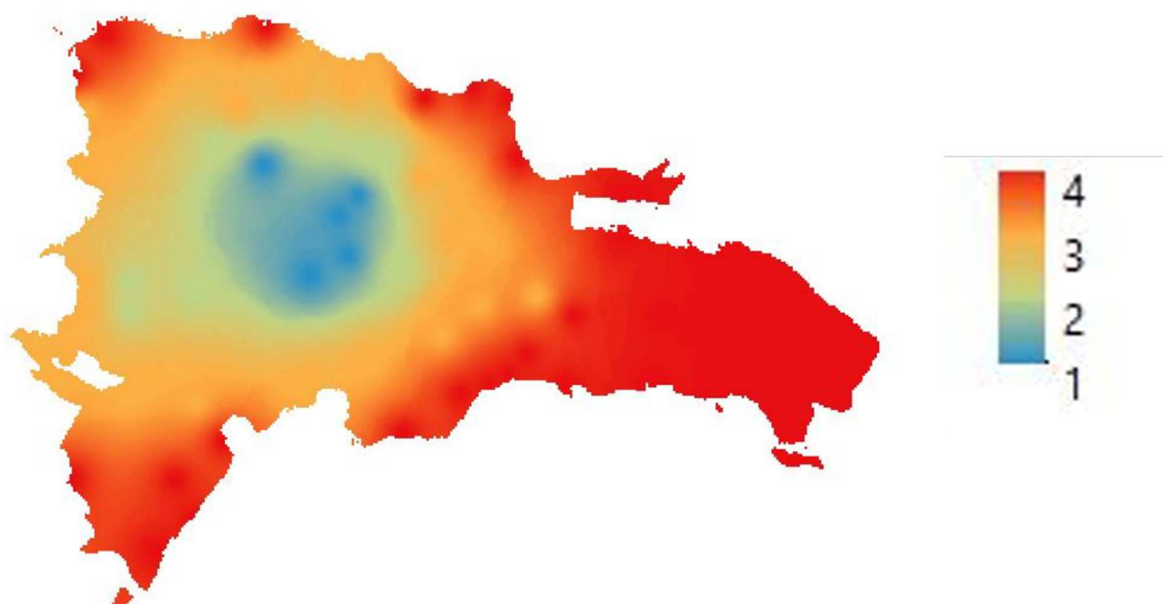
<b>N.º</b>	<b>Localidad</b>	<b>Noviembre-marzo (SCLiNM)</b>	<b>Abril-octubre (SCAO)</b>
1	Bonao	V2	V3
2	El Cercado	V2	V4
3	La Vega	V1	V3
4	Las Matas De Farfán	V2	V3
5	Moca	V2	V4
6	Monción	V2	V4
7	Salcedo	V2	V4
8	San José De Las Matas	V2	V3
9	San Juan	V2	V3
10	Santiago	V2	V4

La tabla 26 presenta las localidades que tienen zonas de severidad climática SCLiNM para todo el año y la figura 15 presenta gráficamente como queda el mapa.

Tabla 26. Zonas de severidad climática noviembre-marzo (SCLiNM).

<b>N.º</b>	<b>Localidad</b>	<b>Noviembre-marzo (SCLiNM)</b>	<b>Abril-octubre (SCAO)</b>
1	Constanza	V1	V2
2	Jarabacoa	V1	V2
3	La Castilla	V1	V2

Figura 15. Mapa severidad climática SCLiNM.





Las tablas y figuras siguientes completan los datos que ayudan a tener una visión más abarcante del clima dominicano.

La tabla 27 presenta cada localidad con los valores promedios anual, mensual y diario de radiación solar: radiación horizontal difusa (DHI por sus siglas en inglés, *Diffuse Horizontal Irradiance*), radiación normal directa (DNI por sus siglas en inglés, *Direct Normal Irradiance*), radiación horizontal global (GHI por sus siglas en inglés, *Global Horizontal Irradiance*) (94).

En cuanto a los valores DHI promedio, los mínimos se encuentra en la localidad Las Matas de Farfán (n.º 32 en la tabla) con un valor de 604,91 kWh/(m<sup>2</sup>·año), 50,41 kWh/(m<sup>2</sup>·mes) y 1,65 kWh/(m<sup>2</sup>·día). Los máximos corresponden a la localidad Villa Altagracia (n.º 63 en la tabla) con valores de 784,16 kWh/(m<sup>2</sup>·año), 65,35 kWh/(m<sup>2</sup>·mes) y 2,15 kWh/(m<sup>2</sup>·día).

Para los valores DNI promedio tenemos que los mínimos se encuentran en la localidad Villa Altagracia (n.º 63 en la tabla) con valores de 1597,93 kWh/(m<sup>2</sup>·año), 133,16 kWh/(m<sup>2</sup>·mes) y 4,38 kWh/(m<sup>2</sup>·día), mientras que los valores máximos corresponden a la localidad Las Matas de Farfán (n.º 32 en la tabla) con valores de 2321,26 kWh/(m<sup>2</sup>·año), 193,44 kWh/(m<sup>2</sup>·mes) y 6,36 kWh/(m<sup>2</sup>·día).

Y en cuanto a los valores GHI promedio tenemos que los mínimos corresponden a la localidad Villa Altagracia (n.º 63 en la tabla) con valores de 1839,38 kWh/(m<sup>2</sup>·año), 153,28 kWh/(m<sup>2</sup>·mes), 5,04 kWh/(m<sup>2</sup>·día). Los máximos corresponden a la localidad Tamayo (n.º 62 en la tabla) con valores de 2195,10 kWh/(m<sup>2</sup>·año), 182,92 kWh/(m<sup>2</sup>·mes) y 6,01 kWh/(m<sup>2</sup>·día).

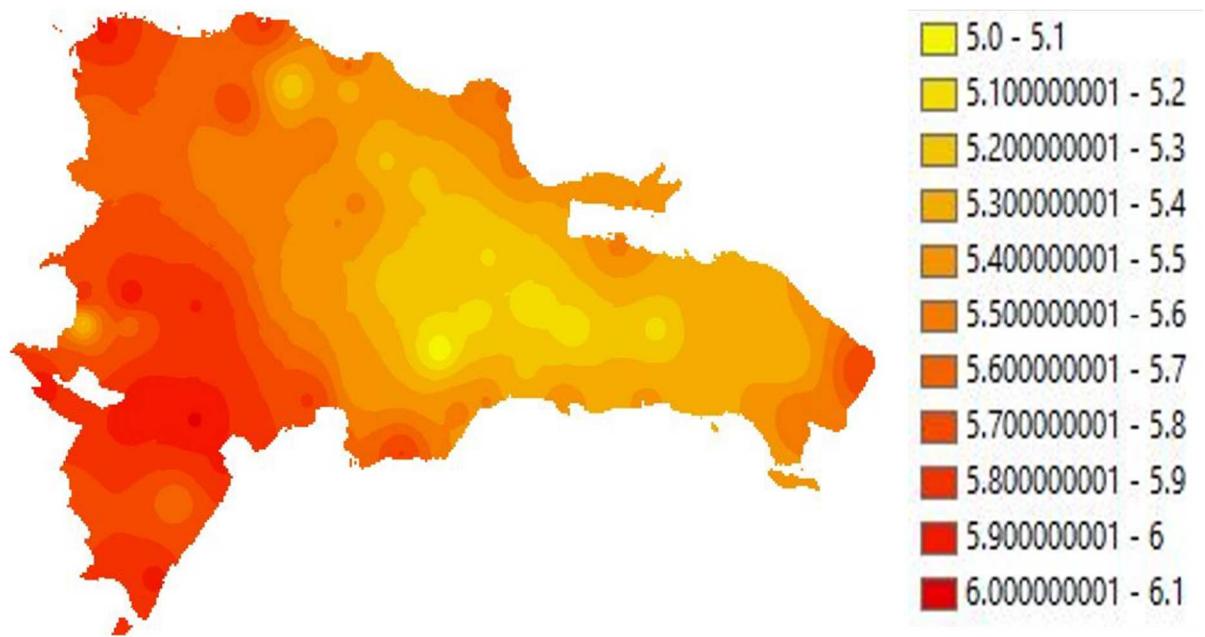
Tabla 27. Valores de radiación solar promedio para cada localidad.

N.º	Localidad	Altitud (m s. n. m.)	DHI			DNI			GHI		
			Anual kWh/ (m <sup>2</sup> -año)	Mensual kWh/ (m <sup>2</sup> -mes)	Día kWh/ (m <sup>2</sup> -día)	Anual kWh/ (m <sup>2</sup> -año)	Mensual kWh/ (m <sup>2</sup> -mes)	Día kWh/ (m <sup>2</sup> -día)	Anual kWh/ (m <sup>2</sup> -año)	Mensual kWh/ (m <sup>2</sup> -mes)	Día kWh/ (m <sup>2</sup> -día)
1	Aeropuerto La Unión	35	680,46	56,70	1,86	2039,52	169,96	5,59	2049,79	170,82	5,61
2	Altamira	430	739,46	61,62	2,02	1814,17	151,18	4,97	1910,99	159,25	5,23
3	Arroyo Barril	193	680,14	56,68	1,86	1987,71	165,64	5,45	1993,10	166,09	5,46
4	Azua	91	675,04	56,25	1,85	2142,49	178,54	5,87	2121,46	176,79	5,81
5	Baní	38	718,50	59,87	1,97	2082,74	173,56	5,71	2119,32	176,61	5,80
6	Barahona	48	692,83	57,74	1,89	2159,58	179,97	5,92	2159,65	179,97	5,91
7	Bayaguana	43	751,11	62,59	2,05	1725,54	143,80	4,73	1875,37	156,28	5,13
8	Bonao	184	731,69	60,97	2,00	1775,03	147,92	4,86	1914,15	159,51	5,24
9	Cabrera	83	667,42	55,62	1,83	2053,48	171,12	5,63	2053,68	171,14	5,62
10	Cevicos	84	757,16	63,10	2,07	1736,39	144,70	4,76	1896,86	158,07	5,19
11	Constanza	1228	662,03	55,17	1,81	2026,61	168,88	5,55	1997,96	166,50	5,47
12	Cotuí	57	751,76	62,65	2,06	1758,43	146,54	4,82	1918,07	159,84	5,25
13	Dajabón	45	657,19	54,77	1,80	2078,71	173,23	5,70	2052,83	171,07	5,62
14	Duvergé	33	647,82	53,99	1,77	2266,12	188,84	6,21	2178,82	181,57	5,97
15	El Cercado	891	651,56	54,30	1,78	2144,75	178,73	5,88	2069,49	172,46	5,67
16	El Seibo	115	721,83	60,15	1,97	1899,88	158,32	5,21	1955,59	162,97	5,35
17	Elías Piña	539	616,81	51,40	1,69	2246,98	187,25	6,16	2130,23	177,52	5,83
18	Enriquillo	0	725,95	60,50	1,99	2034,26	169,52	5,57	2098,72	174,89	5,75
19	Gaspar Hernández	61	708,35	59,03	1,94	1915,94	159,66	5,25	1988,89	165,74	5,44
20	Hato Mayor	86	744,05	62,00	2,04	1776,13	148,01	4,87	1889,11	157,43	5,17
21	Herrera	41	706,67	58,89	1,93	1956,29	163,02	5,36	2013,52	167,79	5,51
22	Higüey	93	760,10	63,34	2,08	1837,93	153,16	5,03	1937,48	161,46	5,30
23	Hondo Valle	1197	694,62	57,88	1,90	1933,44	161,12	5,30	1933,77	161,15	5,29
24	Jarabacoa	531	672,24	56,02	1,84	1990,78	165,90	5,45	2009,86	167,49	5,50
25	Jimaní	57	621,18	51,77	1,70	2305,10	192,09	6,32	2177,21	181,43	5,96
26	La Castilla	1127	667,26	55,60	1,83	1955,63	162,97	5,36	1971,67	164,31	5,40
27	La Descubierta	208	680,81	56,73	1,86	2115,21	176,27	5,80	2101,23	175,10	5,75
28	La Romana	26	768,18	64,02	2,10	1849,33	154,11	5,07	1969,55	164,13	5,39
29	La Vega	143	687,37	57,28	1,88	1953,74	162,81	5,35	2019,13	168,26	5,53
30	La Victoria	11	738,03	61,50	2,02	1816,50	151,38	4,98	1928,32	160,69	5,28
31	Las Américas	15	712,01	59,33	1,95	1939,67	161,64	5,31	1997,88	166,49	5,47
32	Las Matas de Farfán	472	604,91	50,41	1,65	2321,26	193,44	6,36	2175,73	181,31	5,96
33	Luperón	14	640,40	53,37	1,75	2198,61	183,22	6,02	2125,16	177,10	5,82
34	Mao	64	646,30	53,86	1,77	2177,36	181,45	5,97	2118,37	176,53	5,80
35	Miches	49	707,74	58,98	1,94	1883,10	156,93	5,16	1943,83	161,99	5,32
36	Moca	171	719,49	59,96	1,97	1867,65	155,64	5,12	1969,68	164,14	5,39
37	Monción	320	676,34	56,36	1,85	2011,42	167,62	5,51	2015,54	167,96	5,52
38	Monte Cristi	23	616,01	51,33	1,68	2308,53	192,38	6,33	2163,35	180,28	5,92
39	Monte Plata	66	754,59	62,88	2,06	1717,24	143,10	4,71	1876,47	156,37	5,14

40	Nagua	35	692,81	57,73	1,90	1978,92	164,91	5,42	2023,32	168,61	5,54
41	Neiba	-18	661,93	55,16	1,81	2243,42	186,95	6,15	2179,35	181,61	5,97
42	Oviedo	17	663,75	55,31	1,82	2215,40	184,62	6,07	2161,21	180,10	5,92
43	Pedernales	67	661,05	55,09	1,81	2160,73	180,06	5,92	2101,82	175,15	5,75
44	Pepillo Salcedo	5	646,79	53,90	1,77	2199,94	183,33	6,03	2119,29	176,61	5,80
45	Pimentel	32	756,21	63,02	2,07	1762,80	146,90	4,83	1924,89	160,41	5,27
46	Polo	916	677,13	56,43	1,85	2087,96	174,00	5,72	2048,30	170,69	5,61
47	Punta Cana	18	671,63	55,97	1,84	2159,90	179,99	5,92	2117,70	176,48	5,80
48	Restauración	643	646,09	53,84	1,77	2130,22	177,52	5,84	2067,81	172,32	5,66
49	Río San Juan	57	693,61	57,80	1,90	2003,99	167,00	5,49	2044,16	170,35	5,60
50	Sabana de la Mar	19	669,66	55,80	1,83	2011,14	167,59	5,51	2016,39	168,03	5,52
51	Salcedo	180	753,72	62,81	2,06	1773,34	147,78	4,86	1925,12	160,43	5,27
52	Samaná	95	672,31	56,03	1,84	2012,80	167,73	5,51	2009,98	167,50	5,50
53	San Cristóbal	55	721,89	60,16	1,97	1934,60	161,22	5,30	2018,51	168,21	5,53
54	San Francisco de Macorís	116	753,67	62,81	2,06	1772,74	147,73	4,86	1926,13	160,51	5,27
55	San José de Las Matas	491	660,96	55,08	1,81	2037,41	169,78	5,58	2024,20	168,68	5,54
56	San José de Ocoa	495	711,99	59,33	1,95	1907,97	159,00	5,23	1975,91	164,66	5,41
57	San Juan	417	634,01	52,83	1,73	2251,61	187,63	6,17	2156,16	179,68	5,90
58	San Pedro de Macorís	11	747,35	62,28	2,04	1872,65	156,05	5,13	1980,54	165,04	5,42
59	San Rafael del Yuma	51	716,52	59,71	1,96	1995,76	166,31	5,47	2032,22	169,35	5,56
60	Santiago	168	678,31	56,53	1,86	2016,29	168,02	5,52	2042,06	170,17	5,59
61	Santo Domingo	34	727,77	60,65	1,99	1874,60	156,22	5,14	1970,00	164,17	5,39
62	Tamayo	15	664,37	55,36	1,82	2251,13	187,59	6,17	2195,10	182,92	6,01
63	Villa Altagracia	184	784,16	65,35	2,15	1597,93	133,16	4,38	1839,38	153,28	5,04
64	Yamasá	83	756,70	63,06	2,07	1716,46	143,04	4,70	1892,41	157,70	5,18
65	Yásica	224	718,55	59,88	1,97	1864,40	155,37	5,11	1952,50	162,71	5,34
<b>Promedios totales</b>			<b>695,36</b>	<b>57,95</b>	<b>1,90</b>	<b>1994,42</b>	<b>166,20</b>	<b>5,46</b>	<b>2024,10</b>	<b>168,67</b>	<b>5,54</b>

Tomando GHI promedio por día el mapa de radiación queda de la forma que muestra la figura siguiente.

Figura 16. Mapa de radiación GHI media, kWh/(m<sup>2</sup>·día). (1998-2015).



En la tabla 28 se muestran los valores promedios de las otras variables climáticas presentes en los archivos climáticos analizados.

Tabla 28. Valores promedio para cada localidad de variables climáticas analizadas.

N.º	Localidad	Altitud (m s. n. m.)	Punto de Rocío (°C)	Humedad Relativa (%)	Presión (mbar)	Dirección del Viento (°)	Velocidad del Viento (m/s)
1	Aeropuerto La Unión	35	20,74	79,21	981,24	109,89	1,02
2	Altamira	430	20,83	82,28	981,24	109,89	1,02
3	Arroyo Barril	193	22,13	82,02	1010,16	92,08	0,99
4	Azua	91	21,38	86,38	975,03	86,46	2,59
5	Baní	38	21,11	77,50	975,03	86,46	2,59
6	Barahona	48	21,67	83,24	996,48	91,12	1,35
7	Bayaguana	43	22,48	85,46	1010,96	85,44	2,46
8	Bonao	184	18,94	81,08	928,56	102,05	2,13
9	Cabrera	83	22,17	82,97	1008,96	103,84	1,11
10	Cevicos	84	21,32	86,78	994,25	93,73	0,63
11	Constanza	1228	19,23	88,93	928,56	102,05	2,13
12	Cotuí	57	21,34	86,93	994,25	93,73	0,63
13	Dajabón	45	20,74	79,27	988,71	99,31	2,71
14	Duvergé	33	20,10	78,96	959,59	97,00	2,89
15	El Cercado	891	20,13	85,20	959,59	97,00	2,89
16	El Seibo	115	22,08	80,75	1010,16	92,08	0,99
17	Elías Piña	539	18,24	76,87	962,32	110,68	2,24
18	Enriquillo	0	21,60	80,82	996,48	91,12	1,35
19	Gaspar Hernández	61	22,20	84,22	1008,96	103,84	1,11
20	Hato Mayor	86	22,50	82,70	1010,96	85,44	2,46
21	Herrera	41	22,02	84,14	1001,70	82,07	1,42
22	Higüey	93	21,92	80,73	1011,76	88,74	0,97
23	Hondo Valle	1197	20,08	83,12	967,82	108,30	2,38
24	Jarabacoa	531	19,21	88,16	928,56	102,05	2,13
25	Jimaní	57	20,05	78,64	967,82	108,30	2,38
26	La Castilla	1127	19,27	90,00	928,56	102,05	2,13
27	La Descubierta	208	20,12	81,60	967,82	108,30	2,38
28	La Romana	26	21,86	78,69	1011,76	88,74	0,97
29	La Vega	143	19,00	82,64	928,56	102,05	2,13
30	La Victoria	11	22,01	83,71	1001,70	82,07	1,42
31	Las Américas	15	22,52	82,52	1010,96	85,44	2,46
32	Las Matas de Farfán	472	17,93	78,66	923,82	106,95	2,65
33	Luperón	14	22,60	83,86	1013,83	102,72	3,16
34	Mao	64	20,15	79,22	974,04	106,81	2,65
35	Miches	49	22,09	80,81	1010,16	92,08	0,99
36	Moca	171	20,98	87,89	981,24	109,89	1,02
37	Monción	320	20,28	85,50	974,04	106,81	2,65

38	Monte Cristi	23	22,67	82,94	1013,07	98,90	4,41
39	Monte Plata	66	21,20	81,98	994,25	93,73	0,63
40	Nagua	35	22,18	84,21	1008,96	103,84	1,11
41	Neiba	-18	20,18	81,64	959,59	97,00	2,89
42	Oviedo	17	21,49	77,46	996,48	91,12	1,35
43	Pedernales	67	22,58	82,01	1009,00	101,62	4,04
44	Pepillo Salcedo	5	20,68	77,13	988,71	99,31	2,71
45	Pimentel	32	21,34	86,48	994,25	93,73	0,63
46	Polo	916	21,63	82,07	996,48	91,12	1,35
47	Punta Cana	18	21,86	78,46	1011,76	88,74	0,97
48	Restauración	643	20,67	84,39	988,71	99,31	2,71
49	Río San Juan	57	22,18	83,58	1008,96	103,84	1,11
50	Sabana de la Mar	19	22,14	82,89	1010,16	92,08	0,99
51	Salcedo	180	20,98	87,17	981,24	109,89	1,02
52	Samaná	95	22,12	81,55	1010,16	92,08	0,99
53	San Cristóbal	55	22,03	84,04	1001,70	82,07	1,42
54	San Francisco de Macorís	116	21,81	89,14	1008,96	103,84	1,11
55	San José de Las Matas	491	20,70	89,61	981,24	109,89	1,02
56	San José de Ocoa	495	21,39	86,35	975,03	86,46	2,59
57	San Juan	417	18,01	80,14	923,82	106,95	2,65
58	San Pedro de Macorís	11	22,47	81,41	1010,96	85,44	2,46
59	San Rafael del Yuma	51	21,92	80,81	1011,76	88,74	0,97
60	Santiago	168	20,96	86,99	981,24	109,89	1,02
61	Santo Domingo	15	22,02	83,98	1001,70	82,07	1,42
62	Tamayo	15	20,18	81,42	959,59	97,00	2,89
63	Villa Altagracia	184	21,93	87,47	1001,70	82,07	1,42
64	Yamasá	83	21,31	85,34	994,25	93,73	0,63
65	Yásica	224	20,86	82,82	981,24	109,89	1,02
<b>Promedios totales</b>			<b>21,12</b>	<b>83,00</b>	<b>986,01</b>	<b>97,09</b>	<b>1,79</b>

Tradicionalmente se hace referencia a que la República Dominicana es un país cálido y húmedo, con los datos obtenidos y mostrados en este capítulo se puede constatar que la tradición tiene fundamento, porque la temperatura de bulbo seco promedio anual nacional calculada fue de 25,10 °C (ver tabla 21), mientras que la humedad relativa anual obtenida fue 83 % (ver tabla 28), dichos valores están por encima de los mínimos establecidos para que un clima se considere cálido y húmedo (20 °C y 55 % respectivamente) (3) (95).

Los resultados obtenidos indican que el 80,00 % de las localidades tienen una severidad climática abril-octubre (SCAO) para todo el año, en muchos casos permanece constante en su grado máximo, V4, y en otros casos de noviembre a marzo baja a V3. El 15,38 % tienen una severidad climática diferenciada

noviembre-marzo (SCliNM) y abril-octubre (SCAO). El 4,61 % la tienen SCliNM durante todo el año.

En consecuencia, la mayor parte del territorio dominicano está sometido a una severidad climática SCAO que obliga a tomar medidas en la edificación que amortigüen en el interior de esta la carga térmica debida a esta severidad y en consecuencia hacerlas más sostenibles.

En el 15,38 % del territorio el periodo de noviembre a marzo es más llevadero ya que su severidad climática es diferenciada y tomando las medidas oportunas con respecto al aislamiento y materiales es plausible que el gasto energético debido a la climatización pueda reducirse hasta prácticamente cero. En lo que se refiere al resto del territorio, el 4,61 %, cuya severidad climática a lo largo del año es SCliNM no es descartable establecer medidas referentes a la edificación que posibiliten prescindir de sistemas de climatización tomando las medidas adecuadas de aislamiento térmico, orientación de edificios, vegetación, etc.

Esta caracterización climática, aporte de esta tesis, es la primera realizada de la R. D. y se ha desarrollado no solo por las necesidades de los próximos capítulos de esta tesis sino también para disponer de una herramienta que posibilite el desarrollo de medidas de ahorro energético que deberían implementarse en los nuevos edificios y en las rehabilitaciones.

## 5. Bienestar higrotérmico

El ser humano mantiene su temperatura corporal entre unos límites de variación muy próximos y que los debe proteger a toda costa (96).

Las células vivas tienen unos límites de tolerancia a la temperatura. El límite inferior es de unos 0 °C y en él se produce la formación de cristales de hielo. El superior de unos 45 °C, apareciendo a esta temperatura la coagulación térmica de proteínas intracelulares. Ahora bien, en lo que se refiere al hombre sus límites se sitúan entre 35 °C y 41 °C pero durante periodos de tiempo muy cortos. Al objeto de que su temperatura interna permanezca en los citados límites, el cuerpo humano es capaz de desarrollar respuestas fisiológicas, que facilitan la producción o eliminación del calor corporal (96).

### 5.1. Equilibrio térmico del cuerpo humano

La producción de calor metabólico (M) es la principal fuente de calor de nuestro cuerpo. Este calor metabólico depende de la actividad. En reposo y con una respiración de 0,300 litros de oxígeno por minuto se genera una carga térmica de 0,100 kW. Si debido al trabajo el consumo de oxígeno asciende a 1 L/min se genera 0,350 kW de calor además de la energía asociada al trabajo realizado (W). Si nuestro organismo no estuviese dotado de mecanismos de regulación y estuviese desarrollando un trabajo leve o moderado, su temperatura interna se incrementaría a una velocidad de 1 °C por cada 15 minutos. Si las personas están en muy buena forma física es capaz de producir más de 1,2 kW de calor durante un periodo de 1 hora a 3 horas sin que aparezcan trastornos por calor (96) (97).

El medio ambiente es otra fuente desde la cual se puede absorber calor. Se puede absorber calor por radiación (R) y por convección (C) cuando la temperatura de la piel es menor que la temperatura de bulbo seco del aire y la temperatura de globo (utilizada para el calor radiante). Comparando con (M) comúnmente resulta ser fuente de calor menor, esto hace que se convierta en fuente de pérdida calorífica de la piel al aire. La evaporación (E) también resulta ser un proceso de termólisis de importancia, con un elevado calor latente de evaporación del sudor aproximadamente 0,680 kWh/l de sudor evaporado (96).

En entornos neutros térmicamente o fríos, se da el equilibrio entre la termogénesis y la termólisis, sin almacenamiento de calor y temperatura corporal equilibrada (96):

$$M - W \pm R \pm C - E \quad \text{Ec.15}$$

Pero con aumento de la exposición al calor y almacenamiento del calor:

$$M - W \pm R \pm C > E \quad \text{Ec.16}$$

Particularmente, trabajos pesados (aumento gasto de energía M - W), temperaturas ambientes altas (aumentan R + C), humedad alta (limita E) y el uso de ropas gruesas o relativamente impermeables (fungen como barrera para que el sudor se evapore), propician este tipo de situación. Ahora bien, si se prolonga el esfuerzo o la hidratación no es la adecuada, se puede superar (E) porque el organismo se encuentra con la capacidad de secretar sudor limitada (1 l/h y 2 l/h durante periodos de tiempo cortos) (96).



## 5.2. Control de la temperatura del cuerpo

El cuerpo humano es una máquina térmica dotada de mecanismos de autorregulación, que se activan cuando algún estímulo tiene como consecuencia una alteración en la homeostasis. El aumento de la temperatura corporal constituye un cambio homeostático al que el organismo trata de controlar. Dos son las temperaturas corporales que son objetos de la citada regulación: la temperatura interna corporal y la temperatura cutánea. La primera de ellas es la temperatura del núcleo de nuestro cuerpo, en promedio de 37 °C aunque fluctúa a lo largo del día aproximadamente entre 36 °C y 37 °C alcanzando su mínimo durante la madrugada y su máximo en la tarde. La segunda, también conocida como temperatura corporal media, es la de la piel, el tejido subcutáneo y las masas musculares más superficiales. Tiene como misión principal evitar cambios en la temperatura central. Esta temperatura periférica está muy afectada por la temperatura del ambiente, su valor medio se sitúa en 33 °C, llega alcanzar 36 °C o 37 °C con actividad metabólica elevada en ambientes calurosos. Aparece sensación de dolor cuando esta segunda temperatura alcanza los 43 °C o los 10 °C. (96) (98)

En lo que se refiere a la temperatura corporal media se obtiene mediante la siguiente expresión (96) (98):

$$T_{cm} = \alpha * T_r + (1 - \alpha) * T_{sp} \quad Ec.17$$

Donde:

$T_{cm}$  = temperatura corporal media, °C.

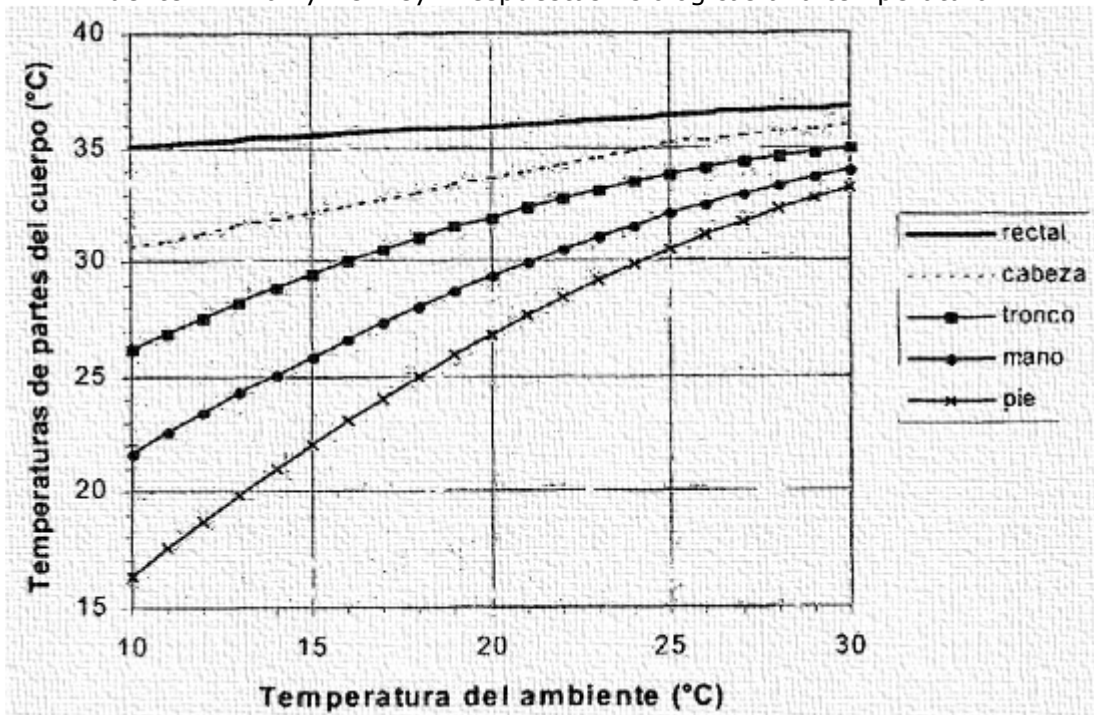
$\alpha$  = factor de ponderación que varía aproximadamente entre 0,67 y 0,90.

$T_r$  = temperatura rectal (interna), °C.

$T_{sp}$  = temperatura superficial/cutánea media (piel), °C.

El cuerpo en reposo tiene diferentes temperaturas que son función de la temperatura ambiente. El gráfico siguiente muestra la temperatura en diversas partes del cuerpo en función de la temperatura ambiente (98).

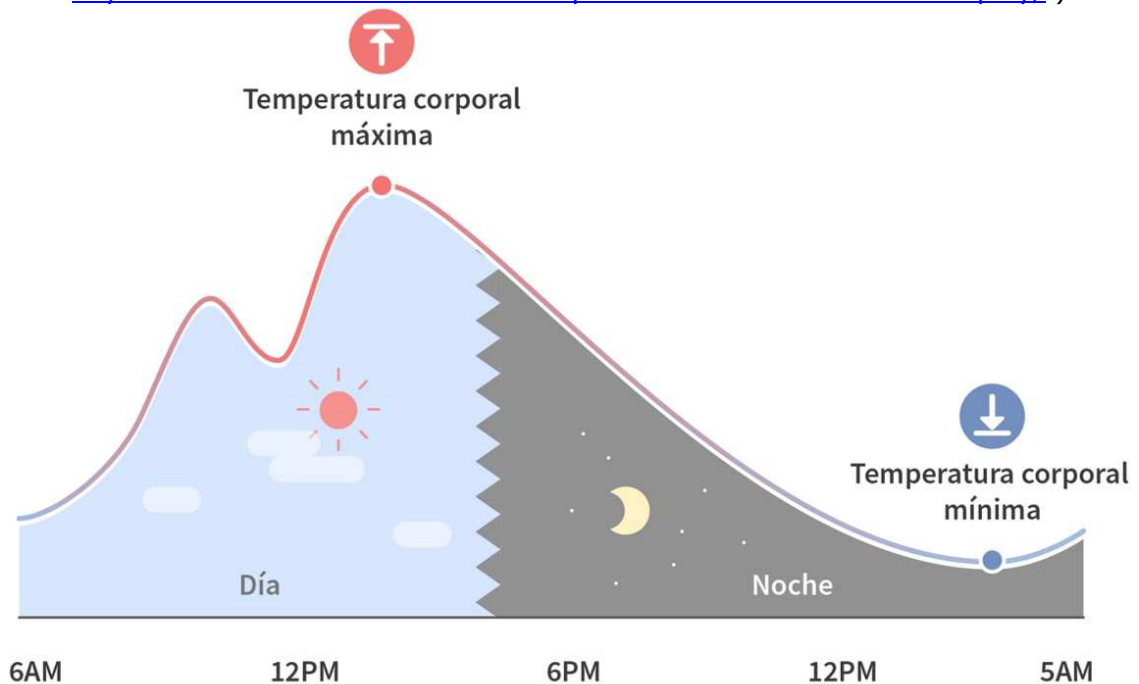
Gráfico 9. Temperaturas de distintas partes del cuerpo.  
 Fuente: W. Larry Kenney "Respuestas fisiológicas a la temperatura".



Con el paso de los años la temperatura corporal va variando. Es conocido que el recién nacido, debido a su inmadurez, tiene problemas para regular la temperatura de su cuerpo, por lo que le afectan mucho los cambios ambientales. La temperatura corporal suele ser más baja en los ancianos, de unos 36 °C. también existe una variación de dicha temperatura a lo largo del día como puede observarse en la figura siguiente (98) (99).

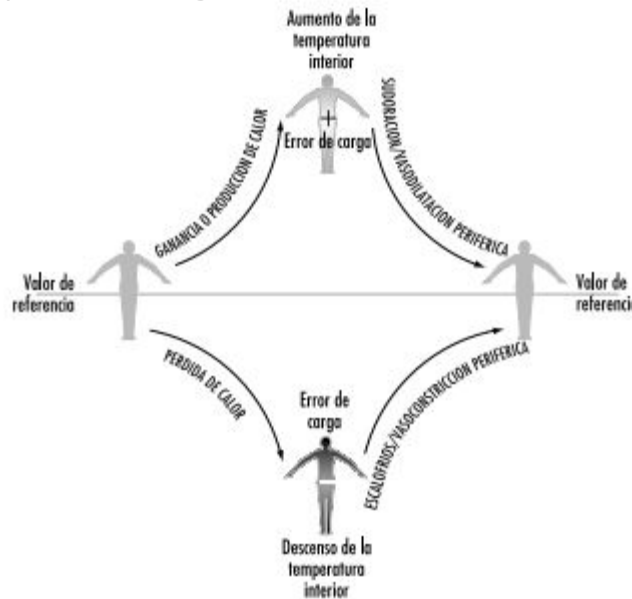
Figura 17. Variación de la temperatura a lo largo del día.

Fuente: Ambi Labs (<https://www.ambiclimate.com/es/blog/2019/02/19/how-time-of-day-dictates-our-comfort-and-which-part-does-our-air-conditioner-play/> )



El ejercicio físico provoca un incremento transitorio de la temperatura corporal y también el enojo, que activa el sistema nervioso autónomo puede aumentar. Toda actividad física genera calor que debemos evacuar. Lógicamente las condiciones ambientales pueden facilitar dicha evacuación. Por otra parte, sucede que el cuerpo recibe calor del medio ambiente. Sea por esta ganancia de calor o por una producción de este, la temperatura corporal se incrementa, lo que desencadena la termólisis, es decir, el aumento del flujo sanguíneo periférico y la sudoración. En el caso de pérdida de calor la que se pone en funcionamiento es la termogénesis (disminución del flujo sanguíneo periférico, escalofríos, tiritonas, etc.). En la figura siguiente se recoge la reacción de nuestro organismo frente a la ganancia o pérdidas de calor (98).

Figura 18. Regulación de la temperatura del cuerpo humano.  
Fuente: enciclopedia de la Organización Internacional del Trabajo capítulo 42.



En consecuencia, vemos que el ambiente térmico está implicado en el intercambio de calor de nuestro cuerpo y, por lo tanto, es necesario analizar dicho ambiente (96) (98) (99).

### 5.3. Ambiente térmico

El ambiente térmico queda definido por una serie de propiedades termodinámicas como son:

- temperatura de bulbo seco del aire (en lo sucesivo  $t_a$ ).

Es la temperatura que marca un termómetro de bulbo seco. Dicho bulbo debe estar protegido de forma que no pueda absorber o emitir calor por radiación y que a su vez tampoco por convección, ya que la citada protección deberá impedir que le afecte el aire en movimiento (98) (100).

- Temperatura de bulbo húmedo o humedad (en lo sucesivo  $t_h$ ).

Es la temperatura que se lee en un termómetro cuyo bulbo se ha envuelto en una gaza empapada de agua, que a su vez está sometida a una corriente de aire que facilita un proceso de enfriamiento evaporativo (98) (100).

- Humedad específica (en lo sucesivo  $w$ ).

Se calcula como el cociente entre la masa de vapor de agua entre la masa de aire seca contenidas en un aire húmedo. Se expresa en kilogramos de vapor por kilogramos de aire seco. La siguiente ecuación nos permite obtener esta humedad específica conociendo la presión parcial del vapor de agua en el aire en hectopascales (hPa) y la  $t_a$  en °C (98) (100):

$$w = 0,621\ 98 \frac{p_v}{p_t - p_v} \quad \text{Ec. 18}$$

$p_v$  = presión parcial de vapor de agua (pascales, Pa).

$p_t$  = presión total (pascales, Pa).

En el caso del aire atmosférico quedaría:

$$w = 0,621\ 98 \frac{p_v}{101\ 325 - p_v} \quad \text{Ec. 19}$$

- Humedad absoluta (en lo sucesivo  $h_a$ ).

Es la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen concreto de aire. Se mide en kilogramos de vapor de agua entre metros cúbicos de aire. Esta humedad se puede determinar por medio de la expresión de Kerslake (1972) (98) (99) (100) (101):

$$h_a = 0,217 \frac{p_v}{(t_a + 273)} \quad \text{Ec. 20}$$

- La presión parcial del vapor de agua.

La presión parcial del vapor de agua puede calcularse conociendo la temperatura seca y la de bulbo húmedo (98) (100) (101).

$$p_v = p_t - 0,667 (t_a - t_h) \quad \text{Ec. 21 (hPa)}$$

- Humedad relativa ( $h_r$ )

Se obtiene como el cociente entre la presión parcial del vapor de agua contenido en el aire y la presión parcial de saturación del vapor de agua a la misma temperatura y presión. Se expresa en tanto por ciento (98) (99) (100) (101).

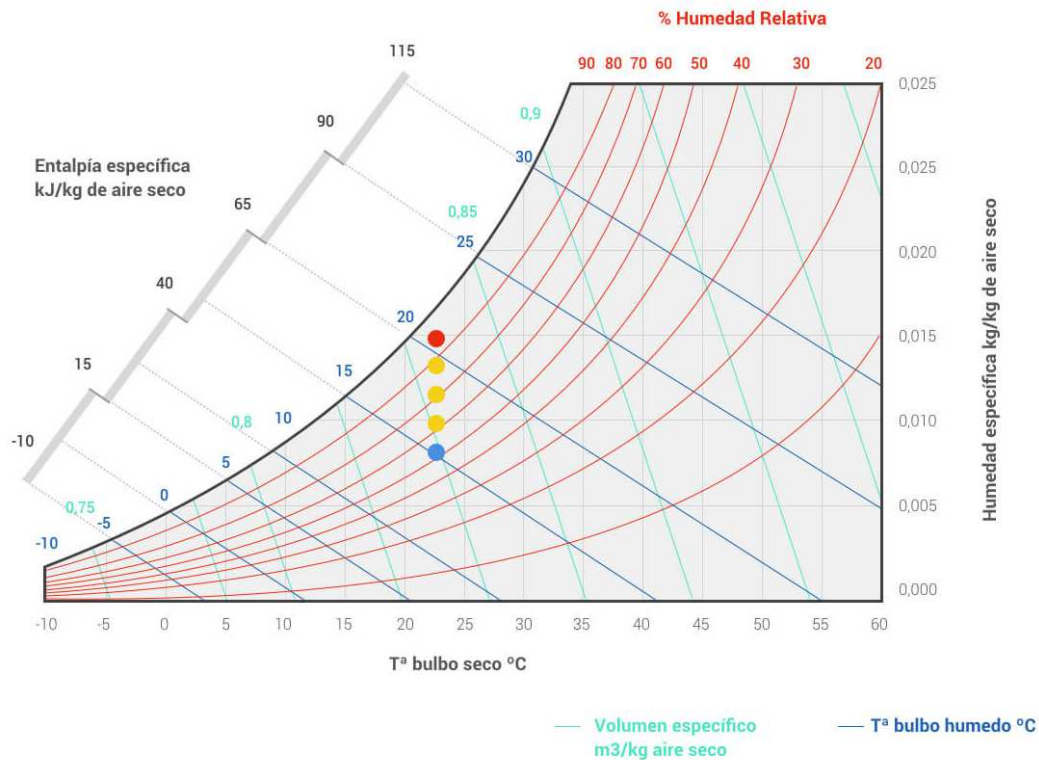
$$h_r = \frac{p_v}{p_{vsat}} * 100 \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

$p_{vsat}$  = presión parcial de vapor saturado a la presión y temperatura de la muestra anterior (hPa).

Figura 19. Diagrama psicrométrico.

Fuente: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/>



- Temperatura de punto de rocío ( $t_{pr}$ )

Temperatura a partir de la cual en un proceso de enfriamiento el vapor contenido en una muestra de aire comienza a formar rocío (°C) (98) (99) (100).

$$t_{pr} = 4030,18 / (18,956 - \ln p_v) - 235 \quad \text{Ec. 23}$$

Tabla 29. Temperatura de rocío a partir de la temperatura seca y húmeda.

Fuente: Emilio Castejón Vilella. NTP18.

		Temperatura seca																Temperatura húmeda												
		10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40		42	44	46	48	50	52	54	56	58	60		
Temperatura seca	10	8,1	6,0	3,6	8,8	-2,7																								
	12	10,3	8,5	6,5	4,1	1,4	-1,9																							
	14	12,5	10,9	9,1	7,2	4,9	2,3	-0,7																						
	16	14,7	13,2	11,8	10,1	8,2	6,1	3,7	0,9	-2,5																				
	18	16,7	15,6	14,2	12,8	11,2	9,5	7,5	5,4	2,9	0,1																			
	20	18,9	17,8	16,7	15,5	14,1	12,6	11,0	9,2	7,3	5,1	2,5	-0,5																	
	22	21,1	20,1	19,1	18,0	16,8	15,5	14,2	12,8	11,2	9,4	7,5	5,3	2,8	-0,2															
	24	23,1	22,3	21,4	20,4	19,4	18,3	17,2	16,0	14,7	13,2	11,7	10,0	8,1	5,9	3,6	0,8	-2,6												
	26	25,3	24,5	23,7	22,8	21,9	21,0	20,0	19,0	17,9	16,7	15,4	14,1	12,6	11,0	9,2	7,3	5,1	2,5	-0,5										
	28	27,3	26,7	25,9	25,2	24,4	23,5	22,7	21,8	20,9	19,9	18,8	17,7	16,5	15,2	13,9	12,4	10,8	9,1	7,3	5,4	3,5	1,6	-0,4						
	30	29,4	28,8	28,1	27,4	26,8	26,0	25,3	24,5	23,7	22,9	22,0	21,0	20,0	19,0	17,9	16,7	15,4	14,1	12,6	11,0	9,2	7,3	5,1	2,5	-0,5				
	32	31,5	30,9	30,3	29,7	29,1	28,5	27,8	27,1	26,4	25,7	24,9	24,1	23,3	22,4	21,4	20,4	19,4	18,3	17,2	16,0	14,7	13,2	11,7	10,0	8,1	5,9	3,6	0,8	-2,6
	34	33,5	33,0	32,5	31,9	31,4	30,9	30,2	29,6	29,0	28,4	27,7	27,0	26,3	25,6	24,9	24,1	23,3	22,4	21,4	20,4	19,4	18,3	17,2	16,0	14,7	13,2	11,7	10,0	8,1
	36	35,5	35,1	34,6	34,1	33,6	33,1	32,6	32,1	31,5	31,0	30,4	29,8	29,2	28,6	28,0	27,4	26,8	26,2	25,6	25,0	24,4	23,8	23,2	22,6	22,0	21,4	20,8	20,2	19,6
	38	37,6	37,2	36,7	36,3	35,9	35,4	35,0	34,5	34,0	33,5	33,0	32,5	32,0	31,5	31,0	30,4	29,8	29,2	28,6	28,0	27,4	26,8	26,2	25,6	25,0	24,4	23,8	23,2	22,6

- Velocidad del aire ( $v_a$ )

Por convenio se considera como la velocidad media obtenida de las velocidades en todas las direcciones. Tiene carácter vectorial y en consecuencia debe quedar definida por su módulo y sentido. Se mide en m/s (98) (100) (101).

- Velocidad relativa del aire ( $v_{ra}$ )

Se mide en m/s y se estima mediante una de las siguientes expresiones (98):

$$v_{ra} = v_a + 0,3 (M - 1) \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

$M$  = metabolismo en met.

$$v_{ra} = v_a + 0,005 2 (M - 58) \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$M$  = metabolismo en W/m<sup>2</sup>.

- Cálculo de la temperatura radiante media en auditorías ( $\bar{t}_r$ )

La  $\bar{t}_r$  se corresponde con el intercambio de calor por radiación entre el cuerpo humano y las superficies que lo rodean. Se mide en °C. Esta temperatura se puede calcular mediante las siguientes ecuaciones (98) (99) (101) (102):

$$\bar{T}_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \cdot \sigma} (T_g - T_a)} \quad \text{Ec. 26}$$

$$\bar{t}_r = t_g + 1,9\sqrt{v_a} (t_g - t_a) \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

$t_g$  = temperatura de globo en °C.

$h_{cg}$  = coeficiente de transferencia de calor por convección, al nivel del globo, en W/(m<sup>2</sup>·K).

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann en W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>).

$\bar{T}_r$  = temperatura radiante media en K.

$T_g$  = temperatura de globo negro en K.

$\varepsilon_g$  = emisividad del globo negro (sin dimensiones).

Este tipo de cálculo implica realizar mediciones en el recinto de interés.

La norma UNE-EN-ISO 7726:2002. Ergonomía en ambientes térmicos recoge cuatro fórmulas, en función de que la persona está expuesta a convección natural o forzada y del tipo de termómetro de globo utilizado.

- Termómetro de globo estandarizado (150 mm de diámetro)
  - o Convección natural

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 |t_g - t_a|^{\frac{1}{4}} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad \text{Ec. 28}$$

- o Convección forzada

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad \text{Ec. 29}$$

- Termómetro de globo no estandarizado
  - o Convección natural

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \left( \frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

$D$  = diámetro del globo en metros.

- o Convección forzada

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6}}{\varepsilon_g \cdot D^{0,4}} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad \text{Ec. 31}$$

- Temperatura radiante media para proyectos

Este tipo de cálculo no implica realizar mediciones en el recinto de interés. Se puede calcular como la raíz cuarta del sumatorio del producto de las temperaturas de los cerramientos del habitáculo por los ángulos sólidos con que estas superficies son vistas desde la ubicación de la persona. Utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{\sum_{i=1} T_{si}^4 F_{pi}^4} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

$T_{si}$  = temperatura superficial (temperatura de una superficie dada), °C.

$F_{pi}$  = factor de forma entre la persona y la pared.

- Temperatura de globo ( $t_g$ )

Es la temperatura que se obtiene con un termómetro de globo negro, se expresa en °C. El termómetro de globo negro lo constituye una esfera negra que tiene en su centro un sensor de temperatura. El diámetro que generalmente se recomienda para la esfera es de 0,15 m (150 mm) que es el valor especificado para emplear las fórmulas antes mostradas. El ennegrecido del globo puede realizarse mediante recubrimiento electroquímico o, más comúnmente, con una capa de pintura negra mate. (101)

## 5.4. Índices de bienestar térmico

### 5.4.1. Temperatura operativa ( $t_o$ )

Técnicamente la norma UNE-EN ISO 7726:2002 la define: "temperatura uniforme de un recinto en el que un ocupante intercambiaría con el ambiente la misma cantidad de calor por radiación y convección que en el ambiente real no uniforme". La temperatura operativa, en forma llana, es la que el cuerpo humano siente. Puede diferir bastante de la temperatura seca del aire. La norma ISO 7243:1989 – Ambientes calurosos. Estimación del estrés térmicos del hombre en el trabajo basados en el índice WBGT (temperatura de globo y bulbo húmedo), es la utilizada por la mayoría de los países caribeños a fin de estimar el estrés térmicos en puestos de trabajo. No ocurre lo mismo con la norma ISO 7933:1989 - Ambientes térmicos calurosos. Determinación analítica e interpretación del

estrés térmico, basado en el cálculo de la tasa de sudoración requerida, por lo que se opta por la primera de ellas. Los problemas de confort térmico son más duros en los países en vías de desarrollo, situados mayoritariamente en la zona tropical y regiones subtropicales y los datos y experiencias de los países desarrollados no deben aplicarse sin reservas a las circunstancias propias de estas zonas tropicales (98) (99) (101) (102) (103) (104) (105) (106).

En condiciones de baja velocidad del aire ( $v_a$  menor a 0,2 m/s) y diferencias de temperaturas pequeñas entre el aire y los paramentos (<4 °C) según la citada norma ISO 7243 puede emplearse la expresión (98) (101) (102) (104):

$$t_o = \frac{t_a + \bar{t}_r}{2} \quad Ec.33$$

La temperatura operativa es una ponderación de la temperatura radiante media y la temperatura seca del aire. Esto significa que ambas contribuyen a la temperatura que siente el cuerpo con sus coeficientes de transferencias de calor radiante y convectivo.

Conforme a la norma UNE-EN ISO 7726:2002. Ergonomía de ambientes térmicos. Instrumentos de medida, cuando la velocidad del aire no es pequeña y/o la diferencia de temperaturas entre los paramentos y el aire tampoco lo es debe emplearse la expresión exacta de la temperatura operativa (98) (101) (102):

$$t_o = \frac{h_c \cdot t_a + h_r \cdot \bar{t}_r}{h_c + h_r} \quad Ec.34$$

Donde:

$t_o$  = es la temperatura operativa, °C.

$t_a$  = es la temperatura del aire (bulbo seco), °C.

$\bar{t}_r$  = es la temperatura radiante media, °C.

$h_r$  = es el coeficiente de intercambio de calor por radiación, W/(m<sup>2</sup>·C).

$h_c$  = es el coeficiente de intercambio de calor por convección, W/(m<sup>2</sup>·C).

En el caso de la figura siguiente se muestra la influencia de la temperatura radiante.



Figura 20. Influencia de la temperatura radiante.

Fuente: <https://e-ficiencia.com/climatizacion-radiante-frente-a-superficies-refrescantes/>



Las personas de las sillas tumbonas disfrutan de confort térmico a pesar de que la temperatura seca del aire es de 0 °C. Esto se debe a que la alta temperatura radiante compensa la baja temperatura del aire, por lo que la temperatura operativa es tal que proporciona dicho confort. En este ejemplo la temperatura radiante suele ser de 50 °C y el cuerpo humano siente una temperatura operativa de 25 °C, todo ello conforme a la ec. 33 ( $t_o = \frac{t_a + \bar{t}_r}{2}$ ). Sin embargo, al medio día de un día caluroso de verano al entrar en una catedral encontramos confort térmico. Las puertas (3 metros × 4 metros) están abiertas por lo que la temperatura seca del aire es la misma que la del exterior, pero la temperatura radiante media es muy inferior ya que las paredes y las columnas de la catedral no sobrepasan los 18 °C.

Otra expresión de precisión para el cálculo de la temperatura operativa (98) (99) (101) (102):

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot \bar{t}_r \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

$A$  = parámetro que debe calcularse a partir de la velocidad relativa del aire ( $v_{ra}$ ) en m/s según los valores de cálculos establecidos en la norma UNE-EN ISO 7726:2002.

La tabla siguiente muestra los valores que toma  $A$  en función de la velocidad relativa del aire.

Tabla 30. Valores de  $A$  en función de la velocidad relativa del aire.

Fuente: UNE-EN ISO 7726:2002.

$v_{ra}$	<0,2	0,2 a 0,6	0,6 a 0,10
$A$	0,5	0,6	0,7

La temperatura operativa también se puede calcular de la siguiente forma:

$$t_o = \frac{t_a \cdot \sqrt{10 \cdot v_a} + \bar{t}_r}{1 + \sqrt{10 \cdot v_a}} \quad \text{Ec. 36}$$

#### 5.4.2. Índice PMV y PPD

La norma UNE-EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local, establece el procedimiento de evaluación de ambientes térmicos moderados. Esta norma se basa en el método Fanger que vincula la temperatura operativa con el voto medio estimado o previsto (PMV en lo sucesivo) y con el porcentaje también estimado o previsto de insatisfecho (PPD en lo sucesivo). La siguiente expresión nos proporciona el porcentaje de insatisfecho en función del voto medio previsto (98) (102) (106) (107) (108).

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,033 53PMV^4 - 0,217 9PMV^2)} \quad \text{Ec. 37}$$

El cálculo del PMV se realiza a partir de las tablas siguientes pudiendo optarse por cualquiera de las tres:

Tabla 31. Escala de valoración de la sensación térmica.  
Fuente: Parsons, 1993; ISO 7730, 1994.

Escala	Valoración
+3	Muy caliente
+2	Caliente
+1	Ligeramente caliente
0	Neutral
-1	Ligeramente frío
-2	Frío
-3	Muy frío

Tabla 32. Escala de valoración de la sensación térmica.  
Fuente: UNE-EN ISO 7730:2006.

Escala	Valoración
+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
0	Neutral
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Muy frío

Tabla 33. Escala de valoración de la sensación térmica.  
Fuente: ASHRAE 55.

Escala	Valoración
+3	Mucho calor
+2	Calor
+1	Algo de calor
0	Neutro
-1	Algo de frío
-2	Frío
-3	Mucho frío

Para una sensación térmica neutra ( $PMV = 0$ ) existirá un 5 % de PPD. Se recomienda no superar un PPD del 10 % lo que se corresponde con un PMV comprendido entre -0,5 y +0,5. El anexo E de la norma UNE-EN ISO 7730:2006 contiene las tablas necesarias para determinar el PMV en función de las siguientes variables (98) (102) (106) (107) (108):

- Temperatura operativa ( $t_o$ ), °C.
- Producción de energía metabólica (M), en  $W/m^2$ . Para actividades ligeras y en posición de sentado se utiliza tabla E.3-Nivel de actividad: 69,6  $W/m^2$  (1,2 met).
- Aislamiento de la vestimenta (resistencia térmica de la ropa, clo): en verano 0,5 clo y en invierno 1 clo.
- Humedad relativa del aire: 50 %.
- Velocidad relativa del aire ( $v_{ra}$ ). En función de la actividad metabólica se elige la tabla correspondiente. En ella se selecciona el aislamiento de la vestimenta (clo) según la época del año, la  $t_o$ , la  $v_{ra}$ , y finalmente se obtiene el PMV.

A modo de ejemplo se presenta un extracto de la tabla E.3 del anexo E.

Tabla 34. Anexo E. Tabla E.3: nivel de actividad 1,2 met (69,6  $W/m^2$ ).  
Fuente: UNE-EN ISO 7730:2006.

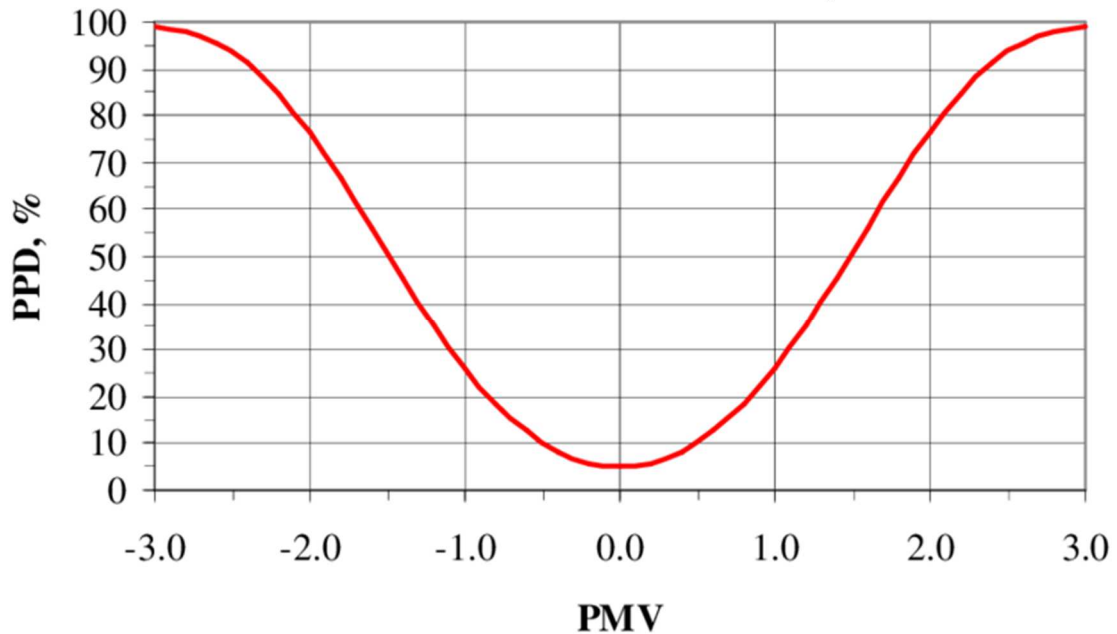
Vestimenta clo	Temperatura operativa °C	Velocidad relativa del aire m/s							
		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,0
0,5	18	-2,01	-2,01	-2,17	-2,38	-2,70			
	20	-1,41	-1,41	-1,58	-1,76	-2,04	-2,25	-2,42	
	22	-0,79	-0,79	-0,97	-1,13	-1,36	-1,54	-1,69	-2,17
	24	-0,17	-0,20	-0,36	-0,48	-0,68	-0,83	-0,95	-1,35
	26	0,44	0,39	0,26	0,16	-0,01	-0,11	-0,21	-0,52
	28	1,05	0,98	0,88	0,81	0,70	0,61	0,54	-0,31
	30	1,64	1,57	1,51	1,46	1,39	1,33	1,29	1,14
1,0	16	-1,18	-1,18	-1,31	-1,43	-1,59	-1,72	-1,82	-2,12
	18	-0,75	-0,75	-0,88	-0,98	-1,13	-1,24	-1,33	-1,59
	20	-0,32	-0,33	-0,45	-0,54	-0,67	-0,76	-0,83	-1,07
	22	0,13	0,10	0,00	-0,07	-0,18	-0,26	-0,32	-0,52
	24	0,58	0,54	0,46	0,40	0,31	0,24	0,19	0,02
	26	1,03	0,98	0,91	0,86	0,79	0,74	0,70	0,58
	28	1,47	1,42	1,37	1,34	1,28	1,24	1,21	1,12
30	1,91	1,86	1,83	1,81	1,78	1,75	1,73	1,67	

clo = unidad de medida de la resistencia térmica de la ropa.  
1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>·K/W.

Si la temperatura obtenida no está recogida en la tabla correspondiente, para calcular el PMV se pueden realizar estimaciones promedios.

Una vez obtenido el PMV, el PPD puede calcularse mediante la expresión de la ec. 37 o mediante el diagrama siguiente:

Figura 21. Relación entre el voto medio previsto y el porcentaje de insatisfechos.  
Fuente: Practical evaluation of the thermal comfort parameters.



#### 5.4.2.1. Disconfort térmico local

Esta sección y todos sus respectivos apartados están referenciados a la siguiente bibliografía: norma UNE-EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (106). Otras ver (98) (107).

El índice PMV y PPD sirve para evaluar, como se ha dicho, el bienestar térmico del cuerpo en su conjunto. Ahora bien, el disconfort térmico puede localizarse también en una única parte del cuerpo lo que se conoce como disconfort térmico local. Las causas de dicho disconfort pueden ser corrientes de aire, diferencia de temperaturas entre cabeza y tobillos anormalmente alta, asimetría de temperatura radiante y suelos calientes o fríos.

El disconfort térmico local se manifiesta de manera más perceptible cuando las personas desarrollan una actividad ligera o sedentaria. El riesgo de este disconfort decae con el aumento de la actividad. Las personas que manifiestan disconfort térmico local deben tener una sensación térmica para el conjunto de su cuerpo cercana a la neutral, para poder determinar el porcentaje de insatisfecho por disconfort térmico local.

#### 5.4.2.1.1. Porcentaje de insatisfechos por corrientes de aire

El disconfort debido a corrientes de aire se expresa como el porcentaje estimado de personas insatisfechas debido a las molestias causadas por tales corrientes.

El flujo de aire en un local por regla general es turbulento mientras su velocidad fluctúa al azar. La intensidad de la turbulencia depende de la velocidad media del aire y de la desviación estándar de la velocidad de fluctuación. La percepción que una persona tiene de una corriente de aire depende de lo siguiente:

- Velocidad del aire.
- Grado de turbulencia del aire.
- Temperatura del aire.
- Área de la superficie expuesta del cuerpo.
- Sensación térmica de la persona: una persona con sensación calurosa percibe la corriente como algo agradable mientras que una persona con sensación fría la percibe como una molestia.

Fanger experimentó en cámaras climáticas con grupos de 150 personas, que fueron expuestas a temperaturas secas del aire que fluctuaban entre 20 °C y 26 °C, a velocidades medias del aire entre 0,05 m/s y 0,4 m/s y a unas intensidades de turbulencia entre 0 % y el 70 %. Las citadas personas mantenían una actividad ligera y su sensación térmica permanecía próxima a la neutralidad para el conjunto de su cuerpo modificando su vestimenta, de estos ensayos se obtuvo el índice DR (*draught rate*), proporciona el porcentaje de insatisfecho por corrientes de aire. Este índice se calcula con la expresión siguiente:

$$DR = (34 - t_{a,1})(v_{a,1} - 0,05)^{0,62}(0,37 * v_{a,1} * Tu + 3,14) \text{ Ec. 38}$$

Donde:

$DR$  = porcentaje de personas insatisfechas por corrientes de aire.

$t_{a,1}$  = Temperatura seca del aire (°C).

$v_{a,1}$  = velocidad media local del aire (m/s).

$Tu$  = intensidad de turbulencia local, en tanto por ciento. Se define como la relación entre la desviación estándar de la velocidad instantánea del aire y la velocidad media del aire. Varía entre el 10 % y el 60 %.

En la expresión anterior cuando  $v_{a,1} < 0,05$  m/s se utilizará el valor  $v_{a,1} = 0,05$  m/s. En el caso de  $DR > 100$  % se tomará  $DR = 100$  % y por último, en el caso de que la intensidad de turbulencia local se desconozca se tomará el 40 %.

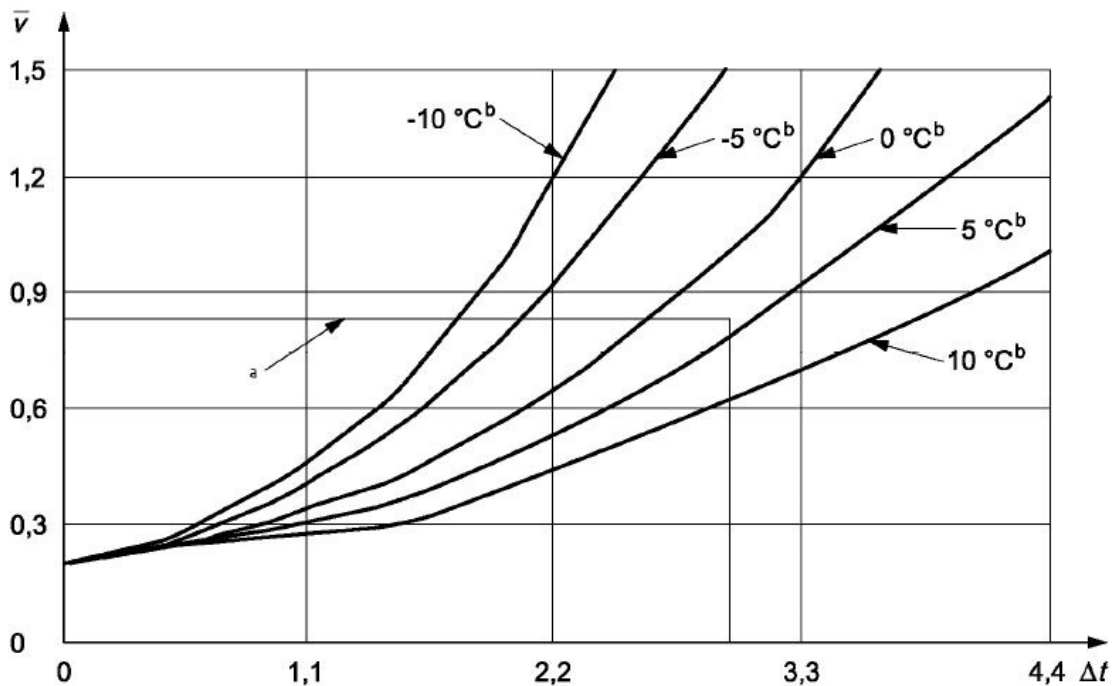
Este modelo se puede aplicar a personas con actividad ligera con una sensación térmica para el conjunto de su cuerpo cercana a la neutra y es apropiado para predecir corriente de aire a la altura del cuello. Si el disconfort térmico local se refiere a la altura de los brazos y de los pies, este modelo tiende a sobrevalorar el porcentaje de insatisfechos ( $DR$ ).

Por otra parte la velocidad del aire influye en el intercambio de calor por convección entre la persona y su entorno, lo que afecta también al bienestar térmico del conjunto del cuerpo. No existe una velocidad del aire mínima que sea necesaria para el bienestar térmico. Ahora bien, es conocido que una velocidad

del aire más elevada compensa la sensación de calor causada por un aumento de temperatura. De aquí la costumbre de abrir ventanas o usar ventiladores para adaptarnos a ambientes más cálidos. Durante la estación veraniega, podemos aumentar la temperatura por encima del nivel de bienestar a condición de que también lo hagamos con la velocidad del aire. En la figura siguiente se muestra hasta donde podemos aumentar la temperatura. Las líneas que se observan en la figura corresponden a distintas combinaciones de temperatura y velocidad del aire que dan como resultado una misma transferencia total de calor por la piel. Dichas curvas tienen como estado de referencia 26 °C y 0,2 m/s de velocidad del aire. El grado de confort térmico que se puede lograr aumentando la velocidad del aire está condicionado por la vestimenta, la actividad y la diferencia entre la temperatura de la superficie ropa/piel y la del aire. La citada figura muestra la velocidad del aire requerida para compensar el incremento de temperatura en el caso de 0,5 clo y 1,2 met.

Figura 22. Velocidad del aire requerida para compensar el incremento de la temperatura.

Fuente: UNE-EN ISO 7730:2006.



Para actividad ligera y fundamentalmente sedentaria,  $\Delta t$  debería ser  $< 3$  °C y  $\bar{v} < 0,82$  m/s.

Donde:

$\Delta t$  = aumento de temperatura por encima de 26 °C.

$\bar{v} = v_a$  = velocidad media del aire, m/s.

a = límites para actividad ligera y fundamentalmente sedentaria.

b =  $(\bar{t}_r - t_a)$ , °C ( $t_a$ , temperatura del aire, °C;  $\bar{t}_r$ , temperatura radiante media, °C).

#### 5.4.2.1.2. Porcentaje de insatisfechos por diferencia vertical de temperatura

En muchos espacios casi siempre la temperatura del aire en un local aumenta con la altura o lo que es lo mismo hay un gradiente vertical de temperaturas. Si este gradiente es suficientemente grande aparece discomfort térmico local, aunque la sensación térmica para el conjunto del cuerpo sea próxima a la neutra. Como consecuencia de los experimentos efectuados en cámaras climáticas con personas en actividad ligera, en confort térmico para el conjunto de sus cuerpos y sometidas a diversos gradientes de temperatura entre tobillos y nuca, se obtuvo la siguiente ecuación de insatisfecho:

$$PI = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 * \Delta t_{n,t})} \quad Ec. 39$$

Donde:

$PI$  = porcentaje de insatisfecho por discomfort térmico local debido a gradiente vertical de la temperatura del aire, %.

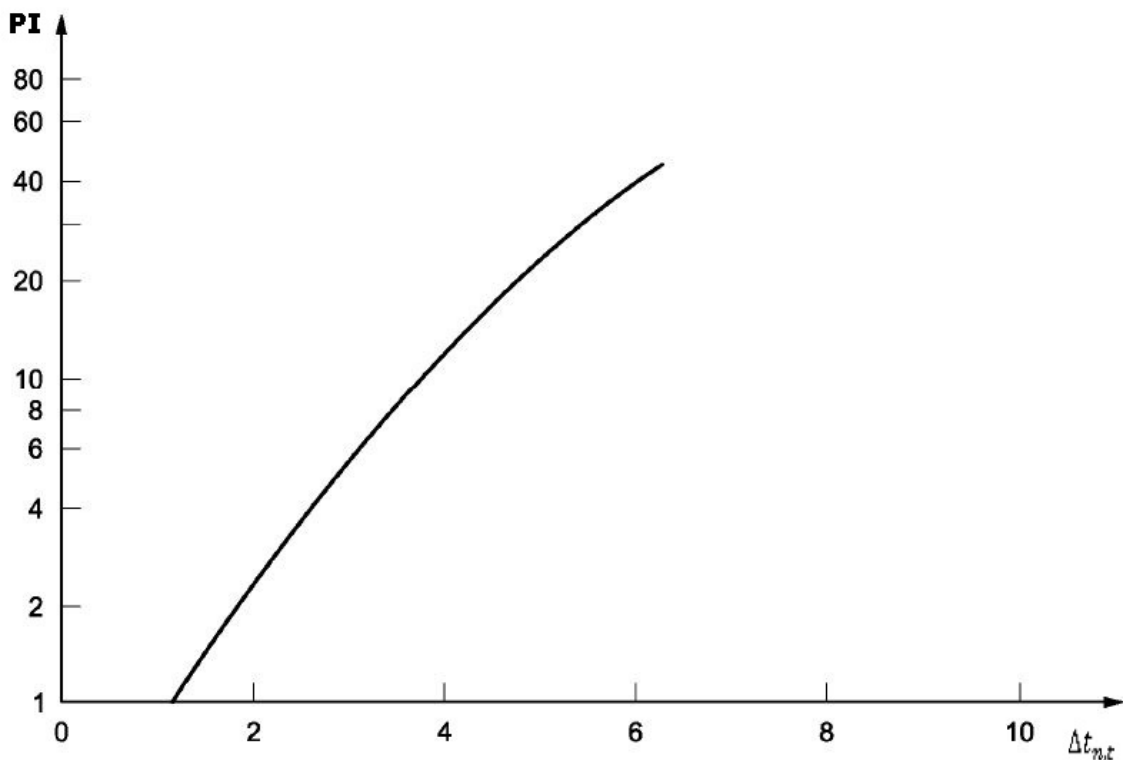
$\Delta t_{n,t}$  = diferencia vertical de temperatura (°C) entre nuca (1,1 m en posición sentado y 1,7 m de pie) y tobillos (0,1 m).

Esta ecuación solo es válida en el caso de que delta  $\Delta t_{n,t} < 8$  °C.

La figura siguiente representa la gráfica del porcentaje de insatisfechos debido a  $\Delta t_{n,t}$ .

Figura 23. Porcentaje de insatisfechos en función de la diferencia vertical de temperatura entre los tobillos (0,1 m) y la nuca (1,1 m en posición sentado y 1,7 m de pie).

Fuente: UNE-EN ISO 7730:2006.



#### 5.4.2.1.3. Porcentaje de insatisfechos por asimetría de temperatura de planos radiantes

Este tipo de asimetría se produce cuando no existe una distribución uniforme de la transferencia de calor por radiación y que usualmente su causa reside en la existencia de superficies frías o calientes. El ser humano es más sensible a la asimetría radiante provocada por techos calientes, paredes frías y ventanas también frías. La asimetría de temperatura de planos radiantes hace referencia a la diferencia de temperatura radiante entre dos planos; por ejemplo, derecha e izquierda, delante y detrás o superior e inferior.

Para determinar el discomfort térmico local generado por la citada asimetría, una vez más, se realizaron diversas experiencias en cámaras climáticas. En dichas cámaras, las personas se encontraban sentadas, con una vestimenta de 0,6 clo y estaban expuestas a planos horizontales calientes por encima de sus cabezas y a planos verticales laterales fríos. La asimetría podía aumentarse o disminuirse modificando la temperatura de los citados planos y manteniendo constante la del resto de los planos. Lógicamente se modificaba el valor de la temperatura radiante media y, en consecuencia, la sensación térmica general. Para poder mantener la neutralidad térmica del conjunto del cuerpo se actuaba sobre el resto de los parámetros siendo una de las opciones modificar la temperatura del aire.

De las opiniones que dieron las personas sobre su sensación térmica pudo establecerse las siguientes ecuaciones entre la asimetría de temperatura de planos radiantes ( $\Delta t_{pr}$ ) y el porcentaje de insatisfechos ( $PI$ ):

- Techos calientes

$$PI = \frac{100}{1 + \exp(2,84 - 0,174 * \Delta t_{pr})} - 5,5 \quad Ec. 40$$

$$\Delta t_{pr} < 23 \text{ } ^\circ C$$

- Pared fría

$$PI = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 * \Delta t_{pr})} \quad Ec. 41$$

$$\Delta t_{pr} < 15 \text{ } ^\circ C$$

- Techo frío

$$PI = \frac{100}{1 + \exp(9,93 - 0,50 * \Delta t_{pr})} \quad Ec. 42$$

$$\Delta t_{pr} < 15 \text{ } ^\circ C$$

- Pared caliente

$$PI = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 * \Delta t_{pr})} - 3,5 \quad Ec. 43$$

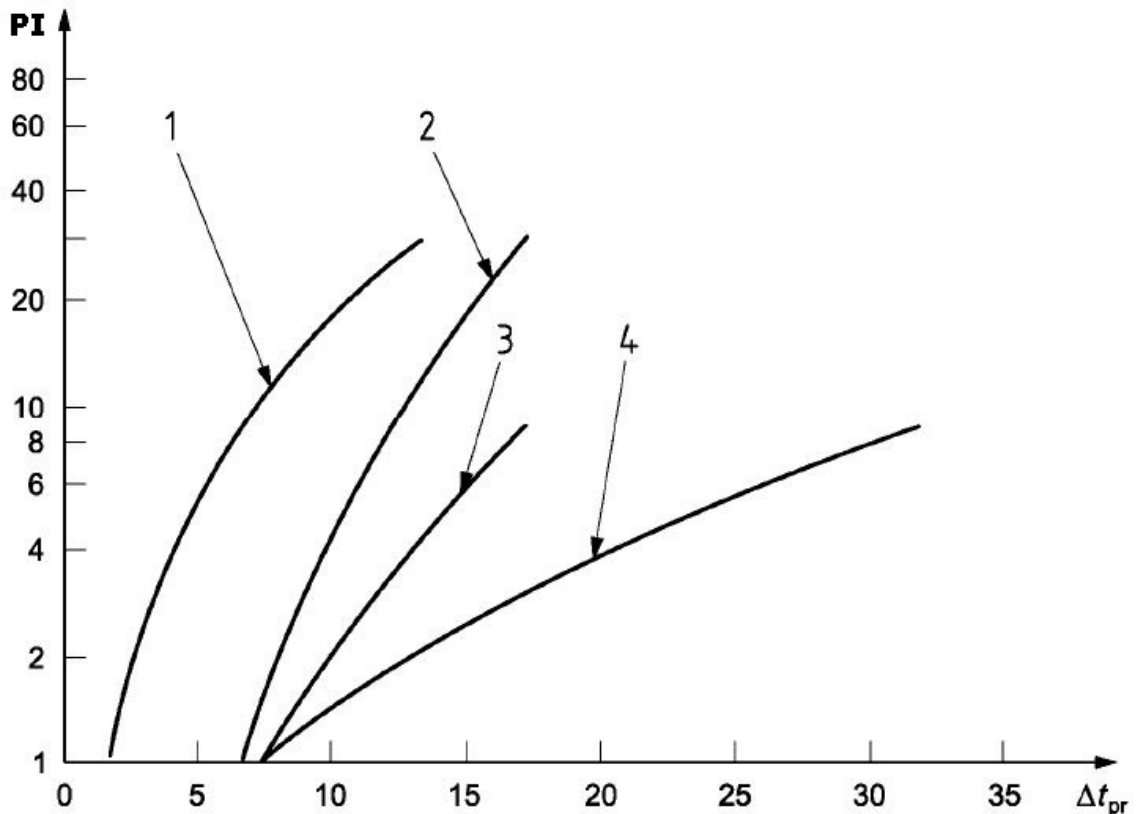
$$\Delta t_{pr} < 35 \text{ } ^\circ C$$

La representación gráfica de las anteriores 4 ecuaciones se representa en la figura siguiente.



Figura 24. Discomfort local provocado por la asimetría de la temperatura de planos radiantes.

Fuente: UNE-EN ISO 7730:2006.



Donde:

$PI$  = porcentaje de insatisfechos por discomfort térmico local debido a la asimetría de temperatura de planos radiantes, %.

$a\Delta t_{pr}$  = asimetría de temperatura de planos radiantes, °C.

1 = techo caliente.

2 = pared fría.

3 = techo frío.

4 = pared caliente.

En la citada figura se observa que las personas son más sensibles a planos horizontales calientes por encima de su cabeza que a planos verticales laterales fríos. Se puede observar que para una diferencia de temperatura radiante de 5 °C, en el caso de techo caliente, le corresponde un porcentaje de insatisfechos del 7 %, mientras que para dicho porcentaje y en el caso de pared fría necesitaríamos una asimetría de temperatura de planos radiantes de 12 °C. Por otra parte, en el resto de los casos se observa que para planos horizontales fríos por encima de la cabeza, para un porcentaje de insatisfecho del 7 % se requiere una diferencia de temperatura de planos radiantes de 15 °C y en el caso de pared caliente dicha diferencia de temperatura tendría que ser de 30 °C.

#### 5.4.2.1.4. Porcentaje de insatisfechos por suelos calientes y fríos

En el caso de contacto directo de los pies con el suelo, el discomfort térmico local es causado por temperaturas muy bajas o muy altas de dichos suelos. No debe olvidarse que la temperatura del suelo influye significativamente en la temperatura radiante media y, en consecuencia, en la temperatura operativa que es la que detecta nuestro organismo. Dicha temperatura del suelo depende del tipo de construcción. Esto es, si dicho suelo está construido sobre la tierra, sobre una bodega o sótano, sobre otra habitación o si se dispone de calefacción por suelo radiante. Los estudios efectuados con personas descalzas sobre suelos de diferentes materiales dieron como resultado el rango idóneo de temperaturas que se muestra en la tabla siguiente. Para distintos tipos de materiales. En estudios realizados con personas calzadas se puso de manifiesto que la temperatura del suelo tenía menor influencia. Para trabajos de tipo sedentario la temperatura óptima fue de 25 °C y para personas de pie o andando 23 °C.

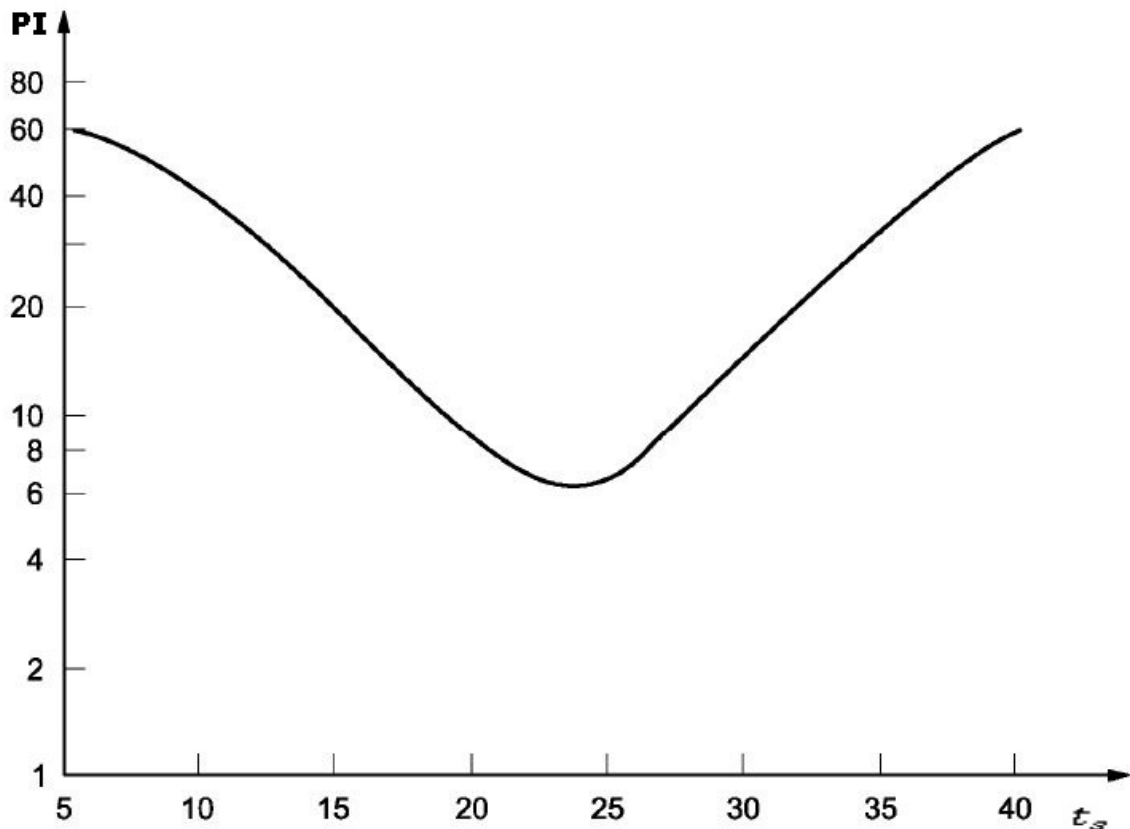
Tabla 35. Temperaturas de confort del suelo para personas descalzas.

Fuente: tesis doctoral "Estudio experimental de las condiciones de confort relacionadas con parámetros higrotérmicos y calidad de aire".

Material del suelo	Temperatura del suelo óptima		Intervalo recomendado de temperaturas (°C)
	Ocupación 1 min	Ocupación 10 min	
<b>Textiles</b>	21	24,5	21-28
<b>Corcho</b>	24	26	23-28
<b>Madera (pino)</b>	25	26	22,5-28
<b>Madera (roble)</b>	26	26	24,5-28
<b>PVC</b>	28	27	25,5-28
<b>Linóleo</b>	28	26	24-28
<b>Cemento</b>	28,5	27	26-28,5
<b>Mármol</b>	30	29	28-29,5

En la figura siguiente se puede observar la gráfica que relaciona el porcentaje de insatisfecho con la temperatura del suelo. Para la obtención de esta grafica se tuvieron en cuenta los resultados de las experiencias realizadas con personas calzadas y descalzas ya situadas de pies o sentadas.

Figura 25. Discomfort térmico provocado por suelos calientes o fríos.  
Fuente: UNE-EN ISO 7730:2006.



Para personas sentadas o acostadas en el suelo el porcentaje de insatisfechos viene dado mediante la ecuación siguiente:

$$PI = 100 - 94 * \exp(-1,387 + 0,118 * t_s - 0,0025 * t_s^2) \quad \text{Ec. 44}$$

Donde:

$t_s$  =temperatura del suelo en °C.

La ecuación anterior no es aplicable para periodos largos de ocupación en el caso de suelos calentados eléctricamente.

El Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios de España (RITE en lo sucesivo), establece en la instrucción técnica 1.1.4 "caracterización y cuantificación de la exigencia de bienestar e higiene", las exigencias de calidad térmica del ambiente en las condiciones de diseño en estos términos (109):

- Caso A
  - o Actividad metabólica sedentaria: 1,2 met.
  - o Grado de vestimenta: 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno.
  - o Para un PPD del 10 % al 15 % se tiene los valores de temperatura operativa y humedad relativa comprendidos entre los límites indicados en la tabla siguiente.

Tabla 36. Valores de  $t_o$  y  $h_r$ .

Fuente: Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE).

Estación	Temperatura operativa °C	Humedad relativa
Verano	23 °C-25 °C	45 %-60 %
Invierno	21 °C-23 °C	40 %-50 %

- Caso B

- o Para valores diferentes de la actividad metabólica, grado de vestimenta y PPD del caso A debe utilizarse el cálculo de la temperatura operativa y la humedad relativa mediante el procedimiento indicado en la norma UNE-EN ISO 7730:2006.

5.4.2.1.5. Categorías de ambientes térmicos

El ambiente térmico que se desea para un lugar se puede seleccionar de las siguientes tres categorías A, B y C como se muestra en la tabla siguiente. Todos los parámetros deben ser satisfechos de forma simultánea para cada categoría.

Tabla 37. Categorías de ambiente térmico.

Fuente: UNE-EN ISO 7730:2006.

Categoría	Estado térmico del cuerpo en su conjunto			Incomodidad local		
	PPD %	PMV	DR %	PD (%) provocada por		
				Diferencia de temp. vertical del aire	Suelo caliente o frío	Asimetría radiante
<b>A</b>	<6	-0,2 < PMV < +0,2	<10	<3	<10	<5
<b>B</b>	<10	-0,5 < PMV < +0,5	<20	<5	<10	<5
<b>C</b>	<15	-0,7 < PMV < +0,7	<30	<10	<15	<10

5.4.3. Extensión del Índice PMV a edificios ubicados en climas cálidos

Esta sección y sus respectivos apartados están referenciados a la siguiente bibliografía: *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates* (110). Otras ver (111) (112) (113) (114) (115) (116).

El índice PMV expuesto en el apartado 5.4.2. se fundamenta en amplios experimentos en los que participaron más de mil personas, que fueron expuestas a ambientes bien controlados (111). Como ya se ha indicado el índice PMV predice la sensación térmica en función de la actividad, el vestuario y los cuatro parámetros térmicos clásicos medioambientales: temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad. La ventaja de este índice estriba en que es una herramienta flexible que incluye las principales variables que determinan la sensación térmica. Este índice cuantifica el impacto absoluto y relativo de los seis factores mencionados y puede utilizarse en ambientes interiores con diferentes sistemas de climatización en los que se desarrollan diferentes actividades y las personas visten de diversas maneras. Habida cuenta que el índice PMV ha sido una norma internacional desde los años

80 (112) (113), ha sido utilizado en un amplio rango de edificios y vehículos a lo largo del mundo.

Mientras el índice PMV predice la sensación térmica de manera acertada en edificios dotados de sistemas de climatización, diversas investigaciones de campo realizadas en edificios sin climatización y ubicados en climas cálidos han puesto de manifiesto que el índice PMV no responde adecuadamente a esta situación. En el caso de edificios no climatizados se ha propuesto un modelo adaptivo (114). Este modelo es una ecuación de regresión que relaciona la temperatura neutra de los ambientes interiores con la temperatura media mensual del ambiente exterior, que en su nivel más alto puede impactar indirectamente sobre el balance térmico del cuerpo humano. Es evidente la debilidad de este modelo adaptativo ya que no incluye la vestimenta o la actividad de las personas o los cuatro parámetros clásicos medioambientales que como es bien sabido determina el balance térmico del cuerpo humano y en consecuencia, sobre la sensación térmica.

Ahora bien, el índice PMV sobreestima la sensación de calor en edificios no climatizados situados en países cálidos como es el caso de la República Dominicana. Existe una aceptación prácticamente general de que la aclimatación fisiológica no desempeña ningún rol (115). Cabe preguntarse, entonces, cual es la causa por la que el índice PMV sobreestima la citada sensación de calor. Algunos han sugerido que las ventanas abiertas en los edificios ventilados naturalmente posibilitan un nivel más alto de control personal que el que puede darse en los edificios climatizados. Esto último ha sido rebatido argumentando que una ventana operable en ocasiones puede utilizarse para conseguir algún control de la temperatura del aire y de su velocidad pero esto únicamente puede aplicarse a las personas situadas en posiciones próximas a las ventanas (116). Lo lógico en climas cálidos, y así ocurre en edificios destinados a oficinas, en caso de ventilación natural es realizar enfriamiento durante la noche y mantener las ventanas cerradas durante el tiempo en el que la temperatura exterior excede a la interior. Fanger y su equipo siempre defendieron que en climas cálidos lo apropiado era el aire acondicionado con termostato de control en cada espacio en lugar de abrir y cerrar ventanas. En esta tesis doctoral no se discute la afirmación de Fanger y su equipo ya que en este caso no se ha focalizado la investigación en edificios de oficinas sino en las viviendas cuya tipología es mayoritaria y el hecho es que en estas viviendas no existe climatización con termostatos en cada habitación. Se puede estar de acuerdo con Fanger en que el índice PMV sobreestima la sensación térmica de las personas en edificios no climatizados de países cálidos.

#### 5.4.3.1. Posibilidad de utilizar el índice PMV en viviendas tipo de la República Dominicana

Es evidente que el índice PMV sobreestima la sensación térmica en países como la República Dominicana y en viviendas cuya tipología es mayoritaria cabe pensar que en evitación de esta sobreestimación el índice PMV deba ser corregido.

Las personas que residen en la vivienda tipo dominicana están acostumbradas a vivir en ambientes calurosos tanto exteriores como interiores y esto ha sido así durante generaciones. Estas personas tienen asumido que la consecuencia de vivir en la República Dominicana es que su sensación térmica sea más calurosa

que neutra. Lo habitual es que estas personas califiquen un ambiente caluroso como menos severo y menos inaceptable que las personas habituadas a tener aire acondicionado. Aparece aquí, a nuestro entender, la aclimatación térmica como factor no contemplado en el índice PMV. Por ello es acertada la propuesta de Fanger de adecuar su modelo PMV a países caluroso mediante la utilización del denominado factor de expectativa, e. Este factor debe multiplicar al PMV para obtener el voto medio correspondiente a la sensación térmica de los ocupantes de un edificio no climatizado en clima cálido. Este factor varía entre 1 y 0. Toma el valor 1 para el caso de edificio climatizado. En el caso de que el clima sea cálido durante todo el año o gran parte del mismo y además las personas evaluadas no estén acostumbradas a permanecer en edificios climatizados el factor "e" toma el valor 0,5. Si las personas acostumbran a permanecer en edificios climatizados el factor toma el valor 0,7. En países en que escasean los edificios climatizados y donde el clima es caluroso solamente en el verano el factor de expectativa está comprendido entre 0,7 y 0,8, ahora bien, si en estos países hay un número elevado de edificios climatizados el citado factor toma valores comprendidos entre 0,8 y 0,9. En regiones con breves periodos de calor durante el verano, el mencionado factor de expectativa toma valores entre 0,9 y 1,0. La tabla siguiente recoge los valores del factor de expectativa.

Tabla 38. Factores de expectativa para edificios no climatizados en climas cálidos.  
Fuente: Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates.

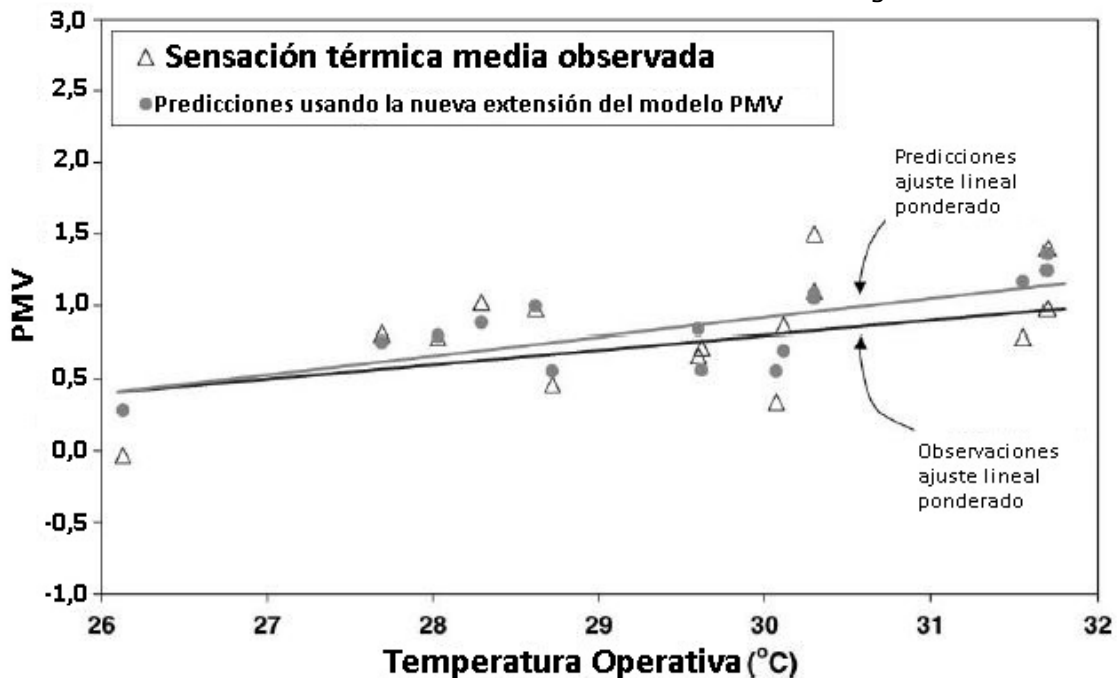
Expectativa	Clasificación de edificios no climatizados		Períodos cálidos	Factor de expectativa, e
	Ubicación			
<b>Alta</b>	En regiones donde los edificios climatizados son comunes		Ocurre brevemente durante la temporada de verano	0,9-1,0
<b>Moderada</b>	En regiones con algunos edificios climatizados.		Temporada de verano	0,7-0,9
<b>Baja</b>	En regiones con pocos edificios climatizados.		Todas las temporadas	0,5-0,7

Es habitual cometer un segundo error que explica la diferencia entre el PMV calculado y la sensación térmica obtenida mediante una encuesta en edificios no climatizados. Este error se debe a la estimación del metabolismo o actividad. En la gran mayoría de los estudios de campos realizados en oficinas la tasa metabólica se estima a partir de un cuestionario en el que se pregunta a cada persona el porcentaje de tiempo que permanece sentada, levantada o paseando. Este cuestionario ignora que de facto las personas cuando sienten calor tienden inconscientemente a ralentizar su actividad. Esto es, lo que hacen es disminuir su tasa metabólica para adaptarse al medio ambiente que se ha vuelto caluroso. Este decremento en la actividad metabólica debería reconocerse utilizando una tasa metabólica reducida al calcular el PMV. Esta hipótesis se estudió a partir de la base de datos correspondientes a ensayos de campo de confort térmico (117).

Estos ensayos de campo se efectuaron en edificios no climatizados durante la estación veraniega de climas cálidos. Más en concreto, los datos procedían de 4 ciudades (Bangkok, Brisbane, Atenas, Singapur) (118) (119) (120) (121). Para el conjunto de estos datos, las tasas metabólicas registradas se redujeron en 6,7 % por cada unidad del PMV por encima del valor neutro, es decir, para un PMV de 1,5 se redujo la tasa metabólica en un 10 %. A continuación, el PMV se recalculó con tasas metabólicas reducidas utilizando la herramienta de confort térmico de ASHRAE (122). Los valores de PMV resultantes se ajustaron entonces para la expectativa, multiplicando con factores de expectativa estimados en 0,9 para Brisbane, 0,7 para Atenas y Singapur y 0,6 para Bangkok. Como promedio para cada edificio incluido en los estudios de campo, el gráfico siguiente muestra la comparación de la sensación térmica media observada con predicciones realizadas con la nueva extensión del modelo PMV para edificios no climatizados en climas cálidos. Las líneas se basan en análisis de regresión lineal ponderados de acuerdo con el número de respuestas obtenidas en cada edificio.

Gráfico 10. Sensación térmica en edificios no climatizados en cuatro ciudades con clima cálido.

Fuente: Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates.



La tabla siguiente muestra la comparación de los votos de sensaciones térmicas observadas y las predicciones realizadas con la nueva extensión del modelo PMV.

Tabla 39. Comparación de votos de sensaciones térmicas en edificios no climatizados en climas cálidos.

Fuente: Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates.

Ciudad	Factor de expectativa, $e$	PMV ajustado a la actividad adecuada	PMV <sub>e</sub> ajustado por expectativa	Voto medio observado
<b>Bangkok</b>	0,6	2,0	1,2	1,3
<b>Singapore</b>	0,7	1,2	0,8	0,7
<b>Athens</b>	0,7	1,0	0,7	0,7
<b>Brisbane</b>	0,9	0,9	0,8	0,8

La nueva extensión del modelo PMV para edificios no climatizados en climas cálidos predice bien los votos reales. La extensión combina lo mejor del PMV y el modelo adaptativo. Reconoce la importancia de las expectativas ya explicadas por el modelo adaptativo, al tiempo que mantiene los parámetros térmicos clásicos del modelo PMV que tienen un impacto directo en el equilibrio térmico humano.

También se debe tener en cuenta que la nueva extensión del PMV predice un límite de temperatura superior más alto cuando el factor de expectativa es bajo. Las personas con bajas expectativas están listas para aceptar un ambiente interior más cálido, que también concuerda bien con las observaciones detrás del modelo adaptativo. Un ejemplo: la relación entre PMV y PPD predice que el 10 % de un gran grupo de ocupantes estará insatisfecho a un PMV de 0,5. Suponiendo que esta relación se mantenga inalterada también con los ocupantes de bajas expectativas, un factor de expectativa dará como resultado un límite de temperatura superior más alto correspondiente a un PMV de  $0,5/e$ , pero con no más del 10 % insatisfecho. La tabla siguiente muestra los límites de temperatura superior ajustados para la expectativa, calculados para 10 % y 20 % insatisfechos. Una expectativa baja puede cambiar el límite de temperatura superior en 2 °C. Es solo el límite de temperatura superior de la zona de confort el que se ve afectado por el factor de expectativa y no se espera ningún ajuste del límite inferior. Los cálculos se realizaron con una tasa metabólica de 1 met, un aislamiento de ropa de 0,5 clo, una velocidad del aire de 0,3 m/s y una humedad relativa del 70 %.



Tabla 40. Ejemplo de límites de temperatura superior de la zona de confort ajustados según las expectativas en edificios no climatizados en climas cálidos.

Fuente: Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates.

Factor de expectativa, $e$	PPD (%)	$PMV_e$	PMV no ajustado	Límite de temperatura superior (°C)
<b>1</b>	10	0,5	0,5	27,9
	20	0,85	0,85	28,7
<b>0,7</b>	10	0,5	0,7	28,3
	20	0,85	1,2	29,4
<b>0,5</b>	10	0,5	1	29,0
	20	0,85	1,7	30,5

El modelo PMV se ha denominado modelo estático, lo que indica que debe prescribir una temperatura constante. Pero esto no es cierto. El modelo PMV en realidad puede predecir cualquier temperatura del aire entre 10 °C y 35 °C como neutra, dependiendo de las otras cinco variables en el modelo. Y prescribe un cierto rango alrededor de la temperatura neutra como aceptable, dependiendo del porcentaje permitido de insatisfecho.

A veces también se afirma que el modelo se aplica solo en condiciones de estado estacionario. Es correcto que el modelo PMV fue desarrollado para condiciones de estado estacionario. Sin embargo, se ha demostrado que se aplica con buena aproximación a las fluctuaciones relativamente lentas de los parámetros ambientales que ocurren típicamente en interiores. Incluso puede aplicarse como una primera aproximación después de los cambios de paso de las variables. Inmediatamente después de un cambio gradual de temperatura hacia arriba, el modelo PMV predice bien la sensación térmica, mientras que toma alrededor de 20 minutos a temperaturas bajas (123).

En resumidas cuentas, el modelo PMV concuerda bien con estudios de campo de alta calidad en edificios con sistemas HVAC, situados en climas fríos, templados y cálidos y estudiados tanto en verano como en invierno. Sin embargo, en edificios no climatizados en climas cálidos, los ocupantes pueden percibir el calor como menos severo de lo que predice el PMV. Esto se debe principalmente a las bajas expectativas, aunque una tasa metabólica que se estima demasiado alta en condiciones cálidas también contribuye a explicar la diferencia. Pero la extensión del modelo PMV incluye un factor de expectativa para su uso en edificios no climatizados en climas cálidos. El modelo extendido del PMV concuerda bien con los estudios de campo de calidad disponibles en edificios no climatizados en climas cálidos de tres continentes.

## 6. Conceptos fundamentales para análisis térmicos de los cerramientos

### 6.1. Parámetros térmicos: definición y formulación

Los parámetros característicos que definen un material son: la densidad, la conductividad térmica, el calor específico y el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua. Estos parámetros nos permiten obtener el coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ), o la resistencia térmica ( $R$ ) del elemento constructivo. En la R. D. y en lo que se refiere a la vivienda tipo, objeto de esta tesis, no existe normativa referida a la evaluación del comportamiento térmico. Ahora bien, en hoteles construidos por empresas europeas del turismo se aplica la normativa del país al que pertenecen dichas empresas. No debe perderse de vista que en la actual normativa europea la evaluación del comportamiento térmico se realiza en régimen permanente, en el que el elemento fundamental a tener presente es la conductividad térmica (124) (125).

Ahora bien, en el caso de régimen dinámico la conductividad térmica sigue siendo necesaria para evaluar el comportamiento térmico del paramento, pero no es ni el único ni el más importante sino que deben tenerse en cuenta otros, tales como: la densidad ( $\rho$ ), el calor específico ( $c_p$ ) y el volumen ( $V$ ). Estos cuatro parámetros posibilitan definir el comportamiento térmico dinámico de un paramento mediante la difusividad térmica, la efusividad y la capacidad térmica (125) (126).

#### 6.1.1. Conductividad térmica y coeficiente global de transferencia de calor

Sea un espacio delimitado por paredes de escaso espesor. Rápidamente se intuye que dichas paredes nos ofrecerán una protección muy pequeña con respecto a las variaciones de temperatura que se produzcan en el exterior. La temperatura interior seguirá dichas variaciones sin apenas matizaciones. En esta situación mantener las condiciones de confort exigirá un consumo energético superior al caso en el que se hubiese añadido unos centímetros de materiales aislantes (124).

Este comportamiento se debe a que el material aislante ofrece una resistencia al paso de calor. Para poder valorar los diferentes materiales desde el punto de vista de su capacidad de aislamiento térmico se utiliza el coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda$ ), que se define como la cantidad de calor que atraviesa una superficie cuya área es de  $1 \text{ m}^2$  y su espesor de  $1 \text{ m}$  cuando el gradiente de temperaturas entre ambos lados es de  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sus unidades en el SI son  $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  (124) (127) (128) (129) (130).

En el caso de una pared que consta de capas paralelas debemos referirnos a la resistencia global de la misma, que es la suma de las resistencias de cada una de las capas. Estas resistencias dependen del espesor y la conductividad de cada capa. El efecto combinado, debido al conjunto de capas, queda recogido por el llamado coeficiente global de transferencia de calor o transmitancia térmica de un cerramiento,  $U$ , que es la cantidad de calor que atraviesa un  $\text{m}^2$  del cerramiento cuando el gradiente de temperatura a ambos lados es de un  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sus unidades en el SI son  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$  (124) (126) (128) (129).

La velocidad de transferencia de calor aumenta con U. Independientemente del valor de U, ambos lados alcanzarán el equilibrio térmico. Ahora bien, el tiempo necesario para alcanzar este equilibrio será diferente (124).

Cabe interrogarse si todos los cerramientos con la misma U tienen igual comportamiento en lo que se refiere a pérdidas y velocidad de estas. La respuesta es afirmativa, sin embargo hay algo más que dicha velocidad que debe tenerse en cuenta (124).

Sean dos paredes bien diferenciadas en cuanto al material pero con un espesor cada una de ellas que posibilita que ambas tengan el mismo valor U. En régimen permanente el perfil de temperatura en el interior del cerramiento tendrá una pendiente constante y la transferencia de calor a través de este no variará al atravesarlo. En consecuencia, hasta aquí ambos cerramientos son equivalentes. Ahora bien, cuando en el exterior comience, por ejemplo, a bajar la temperatura aparecerán diferencias. En esta situación el perfil de temperaturas en el interior presenta una especie de efecto tampón, que es consecuencia de la capacidad de almacenar energía térmica que tiene la pared. Esta capacidad es proporcional a la masa de la pared y al calor específico del material. Así las cosas, queda claro que las propiedades a considerar en relación con este efecto serán la densidad y el calor específico (124).

### 6.1.2. Parámetros que afectan la capacidad de almacenar energía térmica

#### 6.1.2.1 Densidad ( $\rho$ )

La densidad de un material representa su masa por unidad de volumen. Los materiales aislantes livianos como los poliestirenos o las lanas minerales no son densos, mientras que el concreto o la arcilla son mucho más densos (100) (125) (127).

$$\rho = \frac{m}{V} \left( \frac{kg}{m^3} \right) \quad Ec. 45$$

Se intuye que existe una relación entre la densidad y el almacenamiento de calor. Pero la densidad es insuficiente para cuantificarlo.

#### 6.1.2.2. Calor específico ( $c_p$ )

El calor específico, a presión constante, de un material mide la energía térmica necesaria para elevar su temperatura en un grado por unidad de peso (J/(kg·K)). Puede verse como una medida de la cantidad de calor que puede absorber un material por unidad de masa (100) (125) (126) (127) (130).

#### 6.1.2.3. Calor específico volumétrico ( $C_v$ )

El calor específico está referido a la unidad de masa. Una medida más interesante es el calor específico por unidad de volumen que es igual al calor específico ( $c_p$ ) por la densidad ( $\rho$ ) (125) (126).

$$C_v = c_p \cdot \rho \left( \frac{J}{m^3 \cdot K} \right) \quad Ec. 46$$

#### 6.1.2.4. Capacidad térmica (C)

Esta propiedad mide la bondad de un material para almacenar calor. Es una magnitud extensiva, independiente de  $\lambda$ . Es igual al calor específico ( $c_p$ ) por el volumen (V) y por la densidad ( $\rho$ ) (125) (126).

$$C = c_p \cdot V \cdot \rho \quad \left( \frac{J}{K} \right) \quad Ec. 47$$

También se la denomina masa térmica ( $M_T$ ), ya que puede expresarse como el producto del calor específico ( $c_p$ ) por la masa (m) (124) (125) (129):

$$M_T = c_p \cdot m \quad \left( \frac{J}{K} \right) \quad Ec. 48$$

#### 6.1.3. Parámetros que afectan a la velocidad de transferencia de calor

##### 6.1.3.1. Difusividad térmica ( $\alpha$ )

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) es un concepto implicado en la eficiencia del aislamiento térmico en verano en países de clima templado y en los países caribeños a lo largo de todo el año. Este parámetro representa la velocidad con la que se difunde el calor a través de un material. En medios homogéneos y opacos es necesaria su utilización para determinar la temperatura interior de un material al producirse un cambio en su temperatura superficial, es decir, nos indica la facilidad con la que un material sufrirá un cambio de su temperatura interior al hacerlo su temperatura superficial. La difusividad térmica viene dada por el cociente de la conductividad térmica ( $\lambda$ ) entre el calor específico volumétrico ( $C_v$ ) (125) (126) (131):

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_v} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad \left( \frac{m^2}{s} \right) \quad Ec. 49$$

Mientras que la conductividad térmica ( $\lambda$ ) determina la cantidad de calor que fluirá a través de un material, la difusividad térmica ( $\alpha$ ) determina la rapidez con que lo hará. De la ecuación anterior, se infiere que para los materiales con  $\lambda$  similar, el calor fluirá más rápido en aquellos con menor calor específico volumétrico ( $C_v$ ).

##### 6.1.3.2. Efusividad térmica (b)

La efusividad térmica (b) representa la capacidad de un material para intercambiar calor con el entorno en situación de régimen no estacionario (125) (126) (132).

Según (133) la efusividad es la capacidad de un material para absorber y liberar calor, por lo que caracteriza la facilidad con la que el calor puede absorberse en su superficie. Tiende a ser más elevada cuando simultáneamente la conductividad térmica y el calor específico volumétrico también lo son. La efusividad de un material homogéneo se calcula (125) (126):

$$b = (\lambda \cdot C_v)^{\frac{1}{2}} = (\lambda \cdot c_p \cdot \rho)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho} \quad \left( \frac{J}{m^2 \cdot K \cdot s^{\frac{1}{2}}} \right) \quad Ec. 50$$

Según (134) mientras la difusividad térmica varía en torno a medio orden de magnitud, la efusividad térmica varía sobre dos órdenes de magnitud: desde  $b = 2000$  para concreto pesado hasta  $b = 20$  para fibra de vidrio ligero.

En consecuencia, los materiales con alta efusividad térmica, como los metales, no son adecuados para el almacenamiento de calor ya que este se disipará rápidamente al exterior tan pronto como baje la temperatura. Por el contrario, los materiales con baja efusividad, como la arcilla o la piedra, son capaces de almacenar el calor durante mucho más tiempo que los metales.

Los valores de la efusividad se aplican a componentes de un habitáculo. Sin embargo, para que el concepto sea más útil debe ser capaz de reproducir correctamente el comportamiento térmico de todo el habitáculo. En el proyecto experimental PASCOOL (134) únicamente encontraron un parámetro simple para caracterizar la respuesta térmica de una determinada zona de un edificio: la efusividad térmica media ( $b_m$ ). Este parámetro se calcula como la media ponderada por área de los valores de la efusividad térmica de los materiales que componen la superficie de la pared expuesta a cambios de temperatura (126).

El procedimiento para su cálculo está estrechamente relacionado con el cálculo de la transmitancia térmica media de una zona. Si se conoce el valor  $b_i$  de cada superficie interna  $S_i$ , la efusividad térmica media se calcula (126):

$$b_m = \sum \frac{b_i \cdot S_i}{S_{tot}} \quad Ec. 51$$

Donde:

$S_{tot}$  es la suma de las áreas  $S_i$  ( $S_{tot} = \sum S_i$ ),  $m^2$ .

Únicamente se toman en cuenta las capas superficiales expuestas.

Como ya se ha dicho los valores de "b" varían en dos órdenes de magnitud, por lo que (134) sugieren sumar aquellas áreas de paredes que corresponden a materiales masivos expuestos de más de 5 cm de espesor. En conformidad con esto, el cálculo, debe incluir paredes divisorias que están expuestas a ambos lados, pudiendo descuidarse las áreas acristaladas ya que tienen un almacenamiento térmico insignificante.

## 6.2. Transmisión de calor por conducción

La transmisión de calor puede realizarse conforme a tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Las fachadas de la vivienda tipo de la R. D. se fabrican con bloques de concreto hueco enlucidos, tanto interior como exteriormente con mortero de cemento. El calor se transmite principalmente por conducción quedando la convección y la radiación reducidas a las superficies de las paredes y a los huecos que lleva el bloque de concreto. Además de esto, la comprensión completa de la transferencia de calor requiere tener presente el mecanismo mediante el cual se acumula energía térmica en el paramento (125).

Según (135) la energía se acumula en los muros mediante un movimiento vibratorio tridimensional de los átomos que oscila en torno a una posición de equilibrio. Este movimiento se traslada hacia las zonas donde hay menor vibración. La temperatura se corresponde con el valor medio de esta energía

cinética en conformidad con el Principio Cero de la Termodinámica que establece que la temperatura empírica es una propiedad que toma el mismo valor cuando los sistemas están en equilibrio. La citada transferencia de energía no implica desplazamiento de masa. La energía productora del citado movimiento está cuantificada y se denomina fonón al cuanto de dicha energía. En la medida en que las partículas estén más próximas tendrán mayor contacto lo que facilita la transferencia de la vibración entre átomos. Dichos átomos vibran como osciladores térmicos y la energía de los fonones es función de su frecuencia de vibración (125).

Si el material es conductor eléctrico los electrones pueden transportar calor, pero en todos los países los materiales con los que se construyen los cerramientos son dieléctricos por lo que no se tiene en cuenta la contribución del movimiento de electrones a la conductividad térmica. Los fonones son cuasipartículas cuyo sentido de movimiento es contrario al gradiente de temperaturas. La conductividad térmica ( $\lambda$ ) es directamente proporcional al calor específico ( $c_p$ ) y al camino libre medio recorrido por los fonones. Como consecuencia de que el calor específico aumenta con la temperatura, la conductividad térmica no es constante. Ahora bien, el camino libre medio de los fonones disminuye con ella, como consecuencia de que a mayor temperatura se produce un aumento del número de fonones aunque disminuye la probabilidad de interacción entre los mismos (125).

Según (136) la capacidad de vibración de las partículas está condicionada por la estructura interna del material de manera que en la medida en que la estructura es más amorfa la onda térmica se transmite más lentamente (125).

Siguiendo la explicación de (135) existen dos tipos de interacciones entre choques de fonones que es la causa de que se transmita la energía. En el choque denominado proceso Normal se conserva el momento y el denominado Umklapp no se conserva. Ambos procesos son necesarios para la transferencia de calor por conducción, pero el Umklapp limita la conductividad térmica que de otra forma sería infinita. La influencia del proceso Umklapp, limitador de la conductividad térmica, depende de la composición de cada material y de las imperfecciones e impurezas que también afectan al camino libre medio de los fonones (125).

Los materiales sólidos utilizados en la construcción de edificios transmiten con mayor facilidad el calor por conducción que el aire. Ahora bien, los sólidos son porosos y en el caso de los bloques de concreto se tiene una gran porosidad que dificulta la transferencia de calor. Sin embargo, a medida que aumenta la porosidad y disminuye la conductividad térmica se puede llegar a que la transferencia de calor por convección y radiación tenga importancia, como es en el caso de los bloques huecos de viviendas tipo de la R. D. Según Sastre Álvarez 2008 en este tipo de materiales siempre existirá el límite de la conductividad térmica del aire en reposo. Los efectos debido a la radiación y a la convección serán función en gran medida del tamaño del poro y la temperatura. Según (135) en el caso de materiales cerámicos porosos a altas temperaturas la transmisión de calor por radiación tiene un gran peso sobre el total, pero a temperatura ambiente dicho peso es muy pequeño. Además, al ser los poros de pequeño

tamaño y la diferencia de temperaturas en su interior casi nula, la velocidad del aire en dicho interior será despreciable por lo que podemos estimar que la transmisión por convección es nula (125).

$$\lambda_{rad} \approx \frac{4\varepsilon\sigma_B T_2^3 \Delta L}{2 - \varepsilon} \quad Ec. 52$$

Donde:

$\lambda_{rad}$  = conductividad debido a la radiación, W/(m·K).

$\varepsilon$  = emisividad.

$\sigma_B$  = constante de Steffan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8}$  W/[m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>]).

$\Delta L$  = diámetro del poro, m.

### 6.3. Comportamiento de los cerramientos

#### 6.3.1. Cerramiento en régimen estacionario

En este caso la transferencia de calor por conducción (vector  $\vec{q}$ ) es paralela y de sentido contrario al gradiente de temperaturas en la situación en la que la diferencia de temperaturas entre las dos caras del cerramiento permanezca estable y una vez transcurrido el tiempo necesario para vencer la inercia térmica, se producirá una distribución lineal de temperaturas en el interior del material. Este es el caso de menor complejidad al que se puede aplicar la ley de Fourier en un cerramiento de un edificio (125).

En este régimen estacionario de temperaturas se puede obtener la conductividad térmica ( $\lambda$ ), que es imprescindible para comprender el comportamiento energético de la vivienda tipo de la R. D. en este caso ideal, ya que es la constante de proporcionalidad entre el flujo de calor que atraviesa el material y el gradiente de temperatura. En realidad  $\lambda$  no es constante a lo largo del bloque de concreto ya que depende de la temperatura y de la dirección. Exclusivamente cuando el material es monocristalino de red cúbica y en materiales policristalino se da isotropía espacial que posibilita que  $\lambda$  sea independiente de la posición (125):

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad Ec. 53$$

Si se considera la transmisión de calor unidimensional:

$$q = -\lambda \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad Ec. 54$$

Teniendo en cuenta que:

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad Ec. 55$$

Despejando y sustituyendo:

$$\Phi = -\lambda \cdot A \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad Ec. 56$$

El signo negativo indica que el flujo de calor va en dirección opuesta al gradiente de temperaturas (de mayor temperatura hacia menor temperatura) acorde al segundo principio de la Termodinámica.

flujo de calor  $\phi$  representa la cantidad de calor transmitida hacia o desde un sistema por unidad de tiempo:

$$\phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad \text{Ec. 57}$$

Al inverso de la conductividad se le llama resistividad "r" [(m·K)/W] (125) (128):

$$r = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Ec. 58}$$

Entonces:

$$r = -\frac{\nabla T}{\vec{q}} \quad \text{Ec. 59}$$

Mientras que la resistencia térmica (superficial), R [(m<sup>2</sup>·K)/W], es la oposición al paso del calor que ofrece un cuerpo (125) (126) (127) (128) (129):

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad \text{Ec. 60}$$

En el caso de la transmisión de calor unidimensional:

$$R = -\frac{(T_1 - T_2)}{q} \quad \text{Ec. 61}$$

Al inverso de la resistencia térmica se le llama conductancia térmica (superficial),  $G_\theta$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] (125) (127) (128):

$$G_\theta = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{L}{\lambda}} = \frac{\lambda}{L} \quad \text{Ec. 62}$$

Donde:

$\vec{q}$  = densidad de flujo térmico. Dirección normal a la superficie, el módulo en (W/m<sup>2</sup>). La magnitud "q" depende de la orientación respecto a la superficie, siendo máxima en la dirección normal a dicha superficie en cada punto. En ese caso "q" es un vector  $\vec{q}$  llamado densidad de flujo térmico, que es equivalente a la densidad de flujo de calor cuando la transmisión se hace por conducción.

$\lambda$  = conductividad térmica (W/(m·K)).

Q = cantidad de calor (J).

$\phi$  = flujo de calor (W = J/s).

q = densidad (superficial) de flujo de calor (W/m<sup>2</sup>).

L = espesor de la muestra (m).

$\nabla T$  = gradiente de temperaturas (K/m).

$\Delta T$  = salto térmico (K).

$T_1$  = temperatura mayor en una de las caras de la muestra (K).

$T_2$  = temperatura menor en la cara opuesta de la muestra (K).

A = superficie (m<sup>2</sup>).

t = tiempo (s).



Entonces, cuando exista una diferencia de temperaturas constante a lo largo del tiempo, no se toma en cuenta qué tan rápido se pierde o se gana calor sino qué tan fácil fluye el calor a través del material. Se puede ver que la ec. 5 no indica la variación de la temperatura con el tiempo.

### 6.3.2. Cerramiento en régimen dinámico

La temperatura exterior de un edificio está cambiando continuamente no solo a lo largo del día sino a lo largo del año, mientras que la interior permanece más o menos constante. Si consideramos un volumen de paramento de un edificio su energía interna cambiará debido a la transferencia de calor a través de su superficie y al trabajo que se ejerza sobre el mismo (125).

$$dU = \delta Q - \delta W \quad \text{Ec. 63}$$

En el caso de que no exista ningún tipo de trabajo sobre él ( $\delta W = 0$ ) y si no existen fuentes o sumideros de calor todos los cambios en la energía interna se debe a la transferencia neta de calor que atraviesa el paramento. En consecuencia, la variación de energía interna con el tiempo viene dada por la densidad de flujo de calor que atraviesa la superficie de volumen de paramento que hemos tomado (125):

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \vec{q} \quad \text{Ec. 64}$$

Donde:

La variación de la energía interna con el tiempo se expresa como la variación de la energía interna ( $c_p \cdot \rho$ ) por la variación de la temperatura con el tiempo.

Combinando la ecuación 64 con la 53 (Fourier) y tomando el material isótropo:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 \cdot T \quad \text{Ec. 65}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \nabla^2 \cdot T \quad \text{Ec. 66}$$

Sustituyendo la difusividad ( $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ ):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot T \quad \text{Ec. 67}$$

Esta ecuación permite resolver problemas térmicos en medios homogéneos e isótropos en los que la temperatura es función del tiempo. En régimen estacionario esta ecuación se transforma en la ecuación de Laplace (125):

$$\nabla^2 \cdot T = 0.$$

La difusividad nos sirve para valorar la rapidez con la que el calor atraviesa un cuerpo sólido. A continuación se analizan algunos aspectos (125):

1. Debido a dependencia de la conductividad térmica ( $\lambda$ ) de la densidad ( $\rho$ ) no es inmediata la variación de la difusividad (alfa) cuando los citados parámetros también varían. Una mayor densidad puede deberse a una menor porosidad lo que facilita la transferencia de calor en los sólidos pero esto no significa que necesariamente se produzca una mayor rapidez, debido a que un aumento de la

densidad también la conductividad. Lo que se debe encontrar es una expresión que relacione ambas variables para obtener la densidad optima en un material de manera que la velocidad de transferencia de calor sea la que interesa.

2. Siempre se cumple que a mayor  $c_p$ , menor velocidad de transferencia de calor.

3. la resistencia que se opone al paso de calor no es lo más importante. Hay que considerar la rapidez con la que se transfiere calor a través de un paramento y su capacidad de acumularlo. Esto implica que en la realidad el tiempo es un fundamental en el análisis del consumo de energía de una vivienda, como consecuencia de que cuando menos la temperatura exterior varía.

### 6.3.3. Ondas e impedancia térmicas

La transferencia de calor a través de un material solido es compleja a tenor de la existencia de poros que contienen agua y aire (137). Se superponen transferencia de calor por conducción, convección y radiación, a lo que debe añadirse la influencia debida al calor latente de vaporización del agua si hubiera cambio de fase. En otras palabras lo que a la vista aparece como un sólido es una mezcla de fases sólida, líquida y gaseosa. En el caso de los bloques de hormigón el tamaño del poro es lo suficientemente pequeño para despreciar la transferencia de calor por convección. Además, el rango de temperaturas en el que nos movemos hace también despreciable la contribución por radiación. Ahora bien, en los bloques de concreto existen dos huecos por bloques en los que hay que considerar la transferencia por convección y por radiación (125).

En consecuencia, tenemos dos factores que van a condicionar el flujo de calor (125):

1. El clima y la utilización del edificio: el salto térmico.
2. El bloque de concreto: debemos determinar la transferencia de calor a través de este.

En lo que se refiere al salto térmico nunca en régimen estacionario debido a la variación de la temperatura exterior a lo largo del día. El régimen será cíclico pudiendo aproximarse a un régimen senoidal.

En esta situación y según (138) los factores que deben tenerse en cuenta en los paramentos son: la resistencia, las capacidades térmicas y las frecuencia de las ondas térmicas.

Una onda queda definida por su amplitud y frecuencia y en lo que se refiere a las ondas térmicas se consideran dos escalas (125):

1. Escala diaria cuya frecuencia es de 24 h.
2. Escala anual o estacional cuya frecuencia se mide en meses y depende de la zona climática.

Las ondas térmicas atraviesan un paramento con mayor o menor dificultad en función de su frecuencia. Las ondas diarias son detenidas con mayor facilidad que las estacionales o anuales.

En régimen estacionario solo se tiene en cuenta la resistencia térmica, es decir, el coeficiente de conductividad, que es la característica principal de los materiales

aislantes. Sin embargo, en las ondas cíclicas tiene gran importancia la capacidad térmica ( $C$ ) que como se ha visto depende del producto de  $c_p$ ,  $V$  y  $\rho$ .

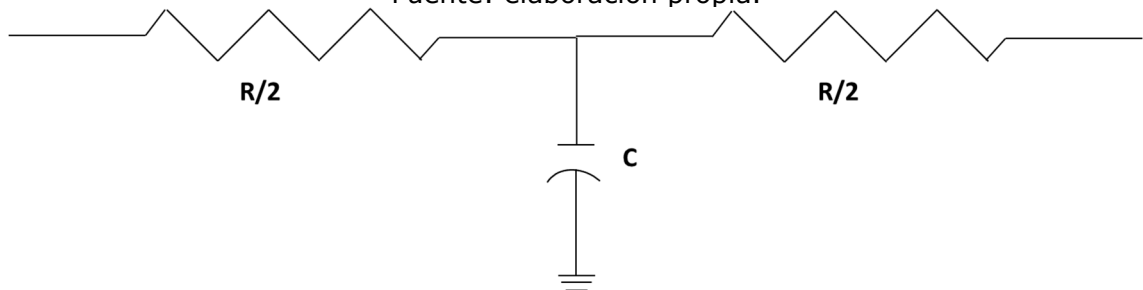
En consecuencia, a medida que aumenta la capacidad térmica, la resistencia al paso de las ondas térmicas es mayor sin que intervenga la conductividad térmica. Puede suceder que un material de mayor conductividad térmica y elevada densidad tenga mejor comportamiento que otro con menor conductividad pero también menor masa.

En la transferencia de calor unidireccional con ondas cíclicas senoidales, una vez alcanzado el régimen cíclico estacionario en el interior de la vivienda se tendría también una onda cíclica senoidal de la misma frecuencia que la exterior pero de menor amplitud en el caso de cerramientos opacos, que es el nuestro.

En (139) fue definido el concepto de impedancia térmica. Este término se mencionó por primera vez en la tesis doctoral "aprovechamiento de la inercia térmica en el ahorro de energía" realizada por J. A. Carrasco en 1982. La impedancia térmica ( $Z$ ), equivale a la resistencia en la ley de Ohm. La impedancia de un circuito queda definida por un número complejo en el que la parte real es la resistencia y está relacionada con la transferencia de calor por conducción en régimen permanente, y la parte imaginaria es la reactancia que es función de la frecuencia de la inductancia y/o de la capacidad. En el caso de un muro homogéneo una aproximación elemental del mismo puede verse en el circuito de la siguiente figura.

Figura 26. Representación elemental de un muro homogéneo compuesto por dos resistencias en serie y un condensador en paralelo.

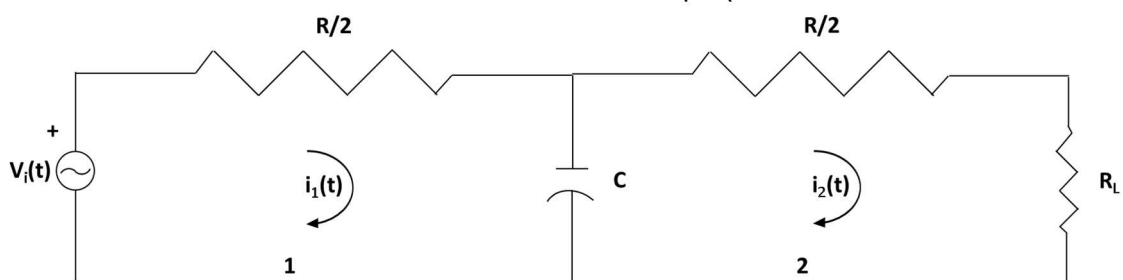
Fuente: elaboración propia.



Para una aproximación de primer orden la expresión del módulo y de la fase o argumento de la impedancia térmica de un muro homogéneo de resistencia térmica  $R$  y capacidad térmica  $C$  puede obtenerse mediante la aplicación de las dos leyes de Kirchoff correspondiente al circuito de la figura siguiente.

Figura 27. Circuito equivalente simplificado de un muro homogéneo.

Fuente: elaboración propia.



En el circuito anterior tenemos un nodo y dos mallas independientes. Conforme al primer lema de Kirchhoff:

$$i_i = i_o + i_c \quad \text{Ec.68}$$

Las ecuaciones diferenciales que satisfacen en su comportamiento los circuitos eléctricos se basan en las leyes de Kirchhoff, que se aceptan como axiomas fundamentales.

- Axioma 1. Primera ley de Kirchhoff

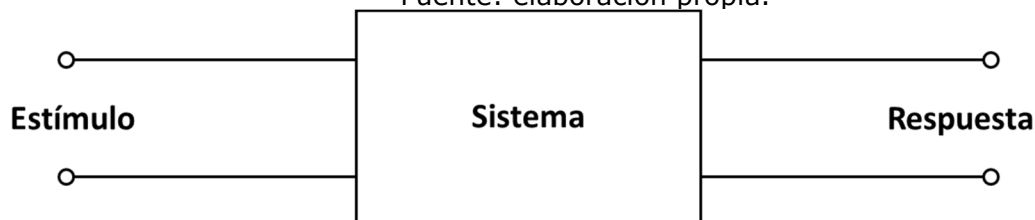
La suma algebraica de las intensidades concurrentes en un nodo es nula en todo instante. Por convención las intensidades entrantes en un nodo se consideran como positivas. Esta ley de Kirchhoff no es más que el principio físico de continuidad referido a circuitos.

- Axioma 2. Segunda ley de Kirchhoff

La suma algebraica de las tensiones y/o caídas de tensión a lo largo de cualquier línea cerrada es nulo en todo instante. Esta ley es aplicable con independencia del tipo de elementos comprendidos en la línea cerrada.

Una de las técnicas básicas del método científico es el estudio de las respuestas de los sistemas físicos ante estímulos o excitaciones que se les aplique, ver figura siguiente.

Figura 28. Relación entre la respuesta de un sistema ante un estímulo.  
Fuente: elaboración propia.



Cabe considerar dos tipos fundamentales de problemas:

- Análisis del comportamiento del sistema: conocido el estímulo y el sistema, determinar la respuesta.
- Síntesis de sistema: conocido el estímulo y la respuesta determinar el sistema.

El estímulo se caracteriza mediante la función de excitación  $A_e(t)$  y la respuesta mediante la función respuesta  $A_r(t)$ . La función de transmisión es una característica del sistema.

$$G(t) = \frac{A_e(t)}{A_r(t)} \quad \text{Ec.69}$$

Según sea la naturaleza de la función de excitación, el análisis puede dividirse en:

- Sistemas excitados por función de excitación invariante en el tiempo.
- Sistemas excitados por función de excitación senoidal, manteniéndose su amplitud o valor máximo y su frecuencia.
- Sistemas excitados por función de excitación que no es de los tipos precedentes.

En lo que se refiere a los sistemas:

- Sistemas lineales, su comportamiento se puede caracterizar por una ecuación diferencial lineal. Sus elementos han de ser lineales.
- Sistemas cuasi lineales, son los que contienen uno o más elementos no lineales pero en un margen de funcionamiento pueden considerarse como lineales.
- Sistemas no lineales, no admiten la hipótesis de la linealidad dentro de un margen de aproximación permisible.

### 6.3.3.1. Elementos ideales de un circuito eléctrico

Cada rama de la ciencia establece modelos matemáticos de los dispositivos físicos reales a fin de evitar la gran complejidad y divergencia de estos últimos.

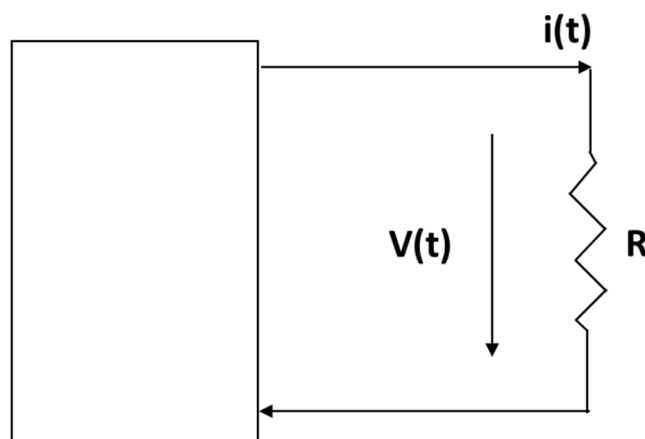
Una idealización usual en teoría de circuitos eléctricos es considerar que sus componentes son de parámetro localizados, es decir, que no ocupan espacio físico y que sus propiedades eléctricas están concentradas en puntos. También, se considera que dichos elementos están conectados por medio de conductores carentes de resistencia.

En lo que interesa a esta tesis son tres los elementos ideales de que constan los circuitos de parámetros localizados: fuentes de tensión, resistencias y condensadores.

Cada elemento se caracteriza por una relación entre la intensidad que lo atraviesa y la tensión que existe entre sus terminales. Las ecuaciones que caracterizan un elemento de circuito se denominan ecuaciones de definición del elemento de circuitos.

#### 6.3.3.1.1. Resistencia

Figura 29. Relación entre la tensión, la intensidad de corriente y la resistencia. Fuente: elaboración propia.



De la figura anterior se obtiene la ecuación de definición que caracteriza dicho elemento de circuito:

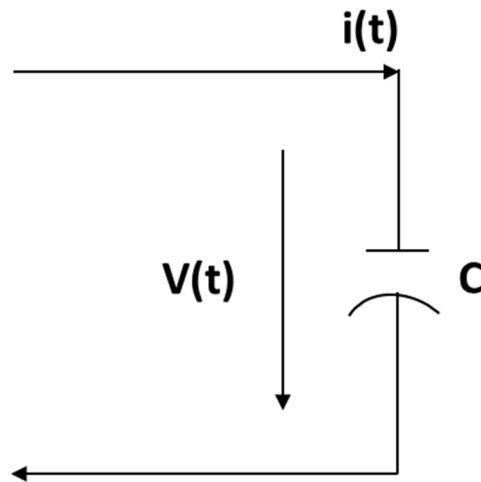
$$V(t) = i(t) \cdot R \quad \text{Ec. 70}$$

La inversa de la resistencia es la conductancia ( $G$ ), que se expresa en siemens.

$$i(t) = V(t) \cdot G \quad \text{Ec. 71}$$

### 6.3.3.1.2. Condensador

Figura 30. Relación entre la tensión, la intensidad de corriente y el condensador.  
Fuente: elaboración propia.



De la figura anterior se obtiene la ecuación de definición que caracteriza dicho elemento de circuito:

$$V(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(t) dt \quad \text{Ec. 72}$$

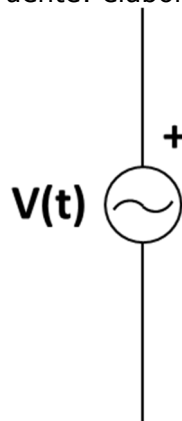
$$i(t) = C \cdot \frac{dV(t)}{dt} \quad \text{Ec. 73}$$

Físicamente el condensador almacena energía eléctrica en virtud de la carga existente en sus armaduras.

### 6.3.3.1.3. Fuente de tensión

Se entiende por fuente ideal de tensión a un generador hipotético cuya diferencia de potencial entre sus terminales es independiente de la corriente que suministra.

Figura 31. Tensión.  
Fuente: elaboración propia.



### 6.3.3.2. Formas de onda

Son funciones de excitación y respuesta, tensiones e intensidades que varían con el tiempo:  $V = V(t)$  o  $i = i(t)$ .

La dependencia funcional puede venir dada analítica o gráficamente. En ambos casos a esa relación funcional se le denomina forma de onda.

Figura 32. Tren de impulsos rectangulares (radar).  
Fuente: elaboración propia.

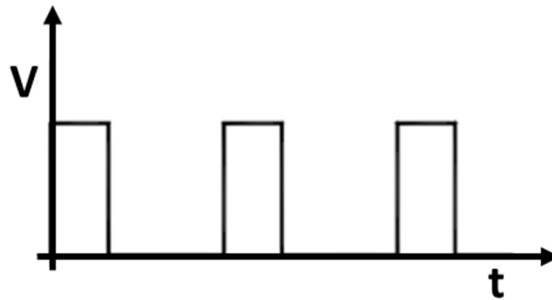


Figura 33. Tensión industrial (senoidal).  
Fuente: elaboración propia.

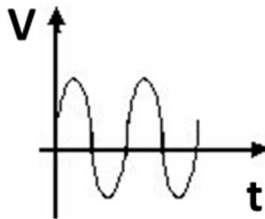
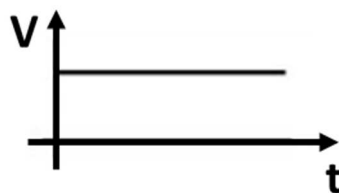


Figura 34. Tensión constante.  
Fuente: elaboración propia.



#### 6.3.3.2.1. Formas de onda periódica

Toda función cuyos valores se repiten en intervalos iguales de tiempo, y en el mismo orden, se dice que es periódica:

$$f(t) = f(t + nT) \quad \text{Ec. 74}$$

Donde:

$n$  = número entero.

$T$  = periodo.

- Ciclo: parte de una onda periódica comprendida en un intervalo de tiempo igual a un periodo.

### 6.3.3.2.1.1. Frecuencia de repetición

Numero de ciclos que tiene lugar en la unidad de tiempo.

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Ec. 75}$$

### 6.3.3.2.1.2. La fase

Fracción de periodo que ha transcurrido desde el instante correspondiente al valor o estado que se toma como referencia.

### 6.3.3.2.1.3. Valores asociados a las formas de onda periódica

- Valor máximo, amplitud o de cresta ( $A_c$ ). Es el mayor valor de la función.
- Valor de cresta a cresta o pico a pico: es la diferencia entre el valor máximo y el mínimo.

$$A_{cc} = A_{c+} - A_{c-} \quad \text{Ec. 76}$$

- Valor medio: es el promedio integral en un periodo, es decir, el valor medio de su ciclo.

$$A_m = \frac{1}{T} \int_0^t f(t) dt \quad \text{Ec. 77}$$

- Valor eficaz: es la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de la función.

$$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t f^2(t) dt} \quad \text{Ec. 78}$$

- Factor de cresta: es la relación entre el valor de cresta y el valor eficaz.

$$f_c = \frac{A_c}{A} \quad \text{Ec. 79}$$

- Factor de forma: es la relación entre el valor eficaz y el valor medio.

$$f_f = \frac{A}{A_m} \quad \text{Ec. 80}$$

### 6.3.3.2.2. Formas de onda senoidales

La función senoidal  $f(t) = A_o \text{sen}(\omega t + \phi)$  es la función periódica de interés en esta tesis. Los términos que la componen son: la amplitud ( $A_o$ ), pulsación ( $\omega$ ), ángulo de fase ( $\omega t + \phi$ ), ángulo de fase inicial ( $\phi$ ).

El periodo T satisface:

$$\omega T = 2\pi \rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi f} = \frac{1}{f} \quad \text{Ec. 81}$$

El estado o valor de esta función queda definido por el argumento ( $\omega t + \phi$ ). Por esto, la fase o diferencia de fases se expresa en valores angulares y no en valores de tiempo. Toda fase está definida por un ángulo comprendido entre 0 y  $2\pi$ , aunque suele utilizarse el intervalo  $(-\pi, \pi)$ . En el paso de valores angulares a valores de tiempo debe recordarse que al periodo (T) le corresponden  $2\pi$  radianes.



Valores en las formas de onda senoidales:

- Valor máximo, de cresta o de pico: coincide con la amplitud.

$$V_{m\acute{a}x.} = A_c \quad Ec. 82$$

- Valor de pico a pico: coincide con el doble de la amplitud.

$$V_{pp} = 2A_c = 2V_{m\acute{a}x.} \quad Ec. 83$$

- Valor medio: en un periodo es cero. En las funciones senoidales se considera el valor medio de un hemiciclo.

$$\begin{aligned} V_m &= \frac{2V_{m\acute{a}x.}}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \text{sen } \omega t \, dt = \frac{2V_{m\acute{a}x.}}{T} \left[ -\frac{\cos \omega t}{\omega} \right]_0^{\frac{T}{2}} = \frac{2V_{m\acute{a}x.}}{\omega T} \left( -\cos \omega \left( \frac{T}{2} \right) + \cos 0 \right) \\ &= \frac{2V_{m\acute{a}x.}}{\omega T} \left( -\cos \frac{\omega T}{2} + \cos 0 \right) = \frac{2V_{m\acute{a}x.}}{2\pi} \left( -\cos \frac{2\pi}{2} + \cos 0 \right) = \frac{V_{m\acute{a}x.}}{\pi} (1 + 1) = \frac{2}{\pi} V_{m\acute{a}x.} \\ &= 0,6336 V_{m\acute{a}x.} \quad Ec. 84 \end{aligned}$$

- Valor eficaz:

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_0 \text{sen } \omega t)^2 dt} \\ &= V_0 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\text{sen } \omega t)^2 dt} = V_0 \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{T}{2} - \frac{\text{sen } 2\omega t}{4\omega} \right)_0^T} = V_0 \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{T}{2} - \frac{\text{sen } 2\omega T}{4\omega} - 0 \right)} \\ &= V_0 \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{T}{2} - \frac{\text{sen } 4\pi}{4\omega} \right)} = V_0 \sqrt{\frac{1}{2}} \\ &V = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad Ec. 85 \end{aligned}$$

- Factor de cresta o factor de amplitud

$$\frac{V_0}{V} = \sqrt{2} \quad Ec. 86$$

- Factor de forma

$$\frac{V}{V_m} = \frac{\frac{V_0}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi} V_0} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \quad Ec. 87$$

### 6.3.3.3. Aplicación de las leyes de Kirchhoff

Si el circuito tiene "n" ramas tendremos 2n incógnitas. Esto es, una tensión y una intensidad por cada rama.

Aplicando la primera ley de Kirchhoff a cada nodo, se formulan "n" ecuaciones nodales y aplicando la segunda ley de Kirchhoff a cada malla independiente tendremos una ecuación llamada circular.

- Método de las mallas

Este método solo se aplica a circuitos planos y se escriben únicamente las ecuaciones circulares de cada malla. Por convención se toma el sentido dextrógiro de la intensidad en cada malla como positivo y cada ecuación circular se escribirá:

Caída total de tensión en elementos pasivos es igual a la suma algebraica de las tensiones de las fuentes.

- Impedancia térmica de los cerramientos (138) (139) (140) (141).

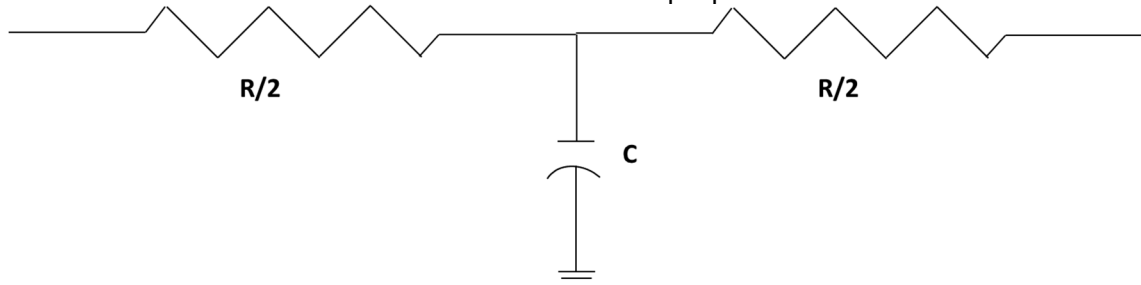
Basándose en el paralelismo entre campos eléctricos y térmicos, la analogía eléctrica ha sido una importante herramienta de cálculo para el estudio y resolución de problemas térmicos. La impedancia ( $Z$ ) es el coeficiente multiplicativo de la corriente y es equivalente a la resistencia ( $R$ ) en la ley de Ohm, obtenida al resolver un circuito en régimen variable. La impedancia de un circuito puede expresarse mediante un número complejo en el que la parte real es la resistencia y la imaginaria la reactancia, que es función de la capacidad y/o inductancia y de la frecuencia (139).

- o Caso de muro homogéneo: aproximación de primer orden

Un muro homogéneo, en primera aproximación, se representa como se indica en la figura siguiente:

Figura 35. Aproximación de primer orden en un muro homogéneo.

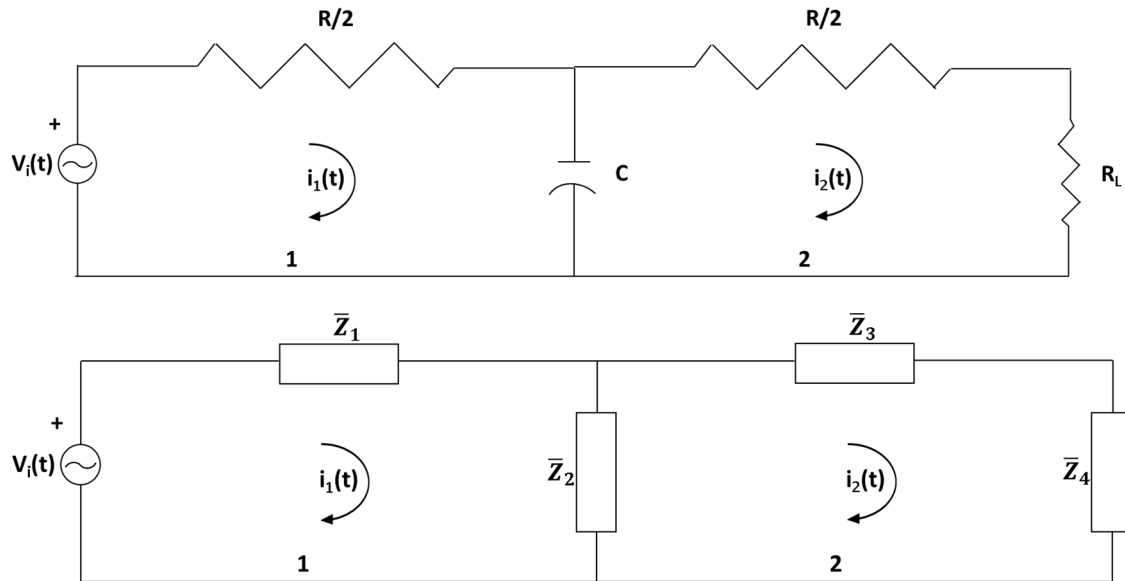
Fuente: elaboración propia.



Este muro es excitado por una función senoidal exterior produciendo una respuesta en el interior. La función de excitación es una onda térmica cuyo periodo es de 24 horas.

El circuito equivalente en tal situación es:

Figura 36. Circuito equivalente de primer orden en un muro homogéneo.  
Fuente: elaboración propia.



$$\bar{Z}_1 = \frac{R}{2} + 0j \quad \text{Ec. 88}$$

$$\bar{Z}_2 = 0 - \frac{j}{\omega C} \quad \text{Ec. 89}$$

$$\bar{Z}_3 = \frac{R}{2} + 0j \quad \text{Ec. 90}$$

$$\bar{Z}_4 = R_L + 0j \quad \text{Ec. 91}$$

$$\omega = 2\pi f \quad \text{Ec. 81}$$

$$j = \sqrt{-1} \quad \text{Ec. 92}$$

$$R_L = \frac{1}{h} \quad \text{Ec. 93}$$

Donde:

$R$  = resistencia térmica del paramento ( $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ ).

$C$  = capacidad térmica del paramento, producto del calor específico por la densidad por el espesor, ( $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ).

$h$  = coeficiente de película de la cara interna del muro ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ).

$\omega$  = frecuencia (rad/s).

Resolviendo por el método de las mallas:

Malla 1:

$$v_i(t) = i_1(t)(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) - i_2(t)\bar{Z}_2 \quad \text{Ec. 94}$$

Malla 2:

$$0 = -i_1(t)\bar{Z}_2 + i_2(t)(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \bar{Z}_4) \quad \text{Ec. 95}$$

Suponiendo  $R \gg R_L$ , luego  $\bar{Z}_3 \gg \bar{Z}_4$

$$0 = -i_1(t)\bar{Z}_2 + i_2(t)(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3) \quad \text{Ec. 96}$$

Poniendo  $v_i(t)$  en función de  $i_2(t)$ :

$$i_1(t) = i_2(t) \frac{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3)}{\bar{Z}_2} \quad \text{Ec. 97}$$

Sustituyendo  $i_1(t)$  en ec. 94:

$$v_i(t) = i_2(t) \frac{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3)}{\bar{Z}_2} (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) - i_2(t)\bar{Z}_2$$

$$v_i(t) = i_2(t) \left( \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_3 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_2} - \bar{Z}_2 \right)$$

$$v_i(t) = i_2(t) \left( \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \frac{\bar{Z}_3 \cdot \bar{Z}_1}{\bar{Z}_2} + \bar{Z}_3 - \bar{Z}_2 \right)$$

$$v_i(t) = i_2(t) \left( \bar{Z}_1 + \bar{Z}_3 + \frac{\bar{Z}_3 \cdot \bar{Z}_1}{\bar{Z}_2} \right)$$

$$v_i(t) = i_2(t) \left[ \left( \frac{R}{2} + 0j \right) + \left( \frac{R}{2} + 0j \right) + \frac{\left( \frac{R^2}{4} \right)}{\left( 0 - \frac{j}{\omega C} \right)} \right]$$

$$v_i(t) = i_2(t) \left( R + \frac{\left( \frac{R^2 \omega C}{4} \right)}{-j} \right)$$

Multiplicando por  $j$  el numerador y denominador del término:

$$\frac{\left( \frac{R^2 \omega C}{4} \right)}{-j}$$

Recordando que:

$$j = \sqrt{-1} \quad \text{Ec. 92}$$

Se obtiene:

$$v_i(t) = i_2(t) \left( R + j \frac{R^2 \omega C}{4} \right)$$

Por lo tanto;

$$\bar{Z} = R + j \frac{R^2 \omega C}{4}$$

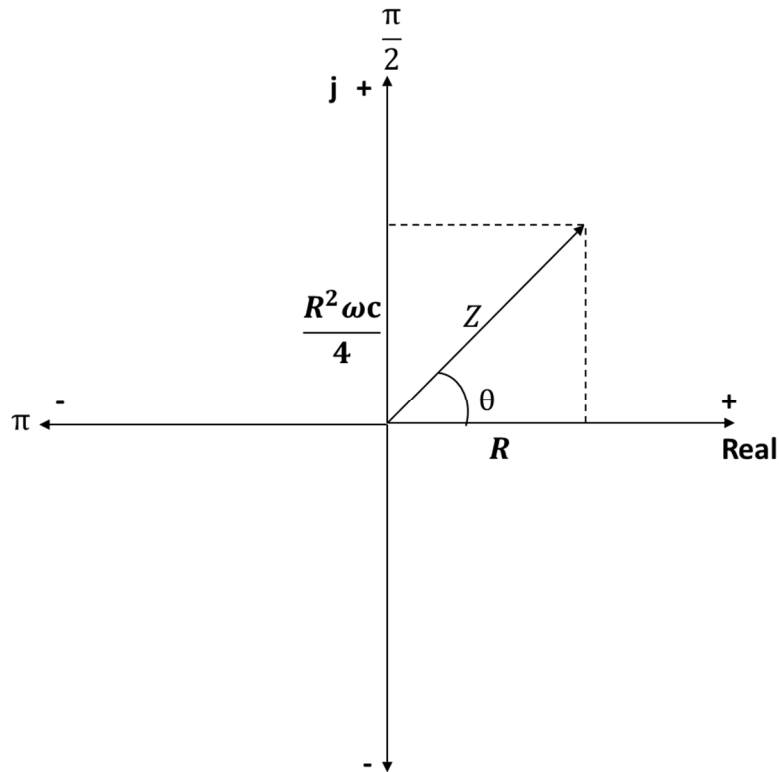
$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{R^4 \omega^2 C^2}{16}} = R \left( \sqrt{1 + \left( \frac{R \omega C}{4} \right)^2} \right) \quad \text{Ec. 98}$$

$$\delta_Z = \text{arc tg} \frac{R^2 \omega C}{4R} = \text{arc tg} \frac{R \omega C}{4} \quad \text{Ec. 99}$$

La impedancia compleja obtenida, para la aproximación realizada, se sitúa en el primer cuadrante del plano complejo, debido a que tanto su parte real como imaginaria son positivas, en otras palabras, la parte real de  $\bar{Z}$  no se hace negativa con un solo elemento RC. En el primer cuadrante citado el argumento máximo de la impedancia es de  $\frac{\pi}{2}$  *radianes*.

Para una onda senoidal cuyo periodo es de 24 h (86 400 s) resulta que a 24 h le corresponden  $2\pi$  *radianes* y en consecuencia a  $\frac{\pi}{2}$  *radianes* le corresponden 6 h.

Figura 37. Representación en el plano complejo.  
Fuente: elaboración propia.



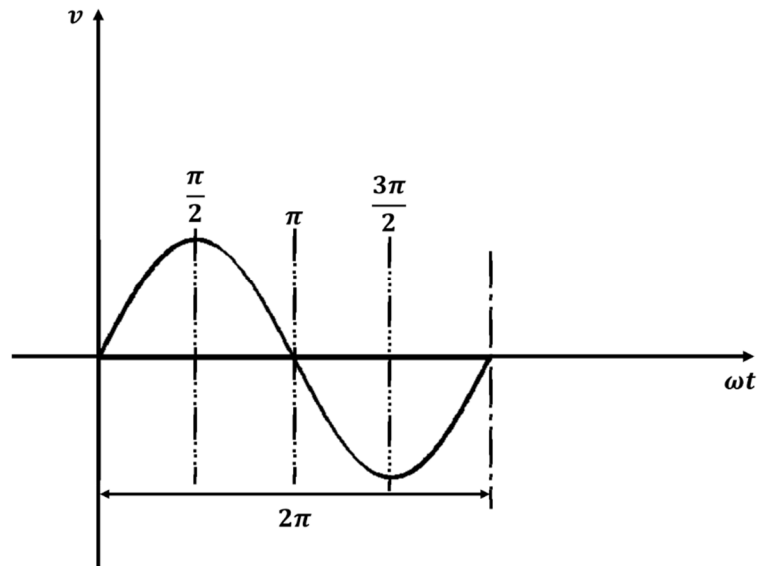
$$\theta_{\text{máx.}} = 90^\circ = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$$

$$T = 24 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = 0,000\,011\,574\,07 \text{ s}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} = 0,000\,023\,148\,15\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Figura 38. Representación en función de la onda senoidal.  
Fuente: elaboración propia.



$$360^\circ = 2\pi \text{ rad} \rightarrow 24 \text{ h}$$

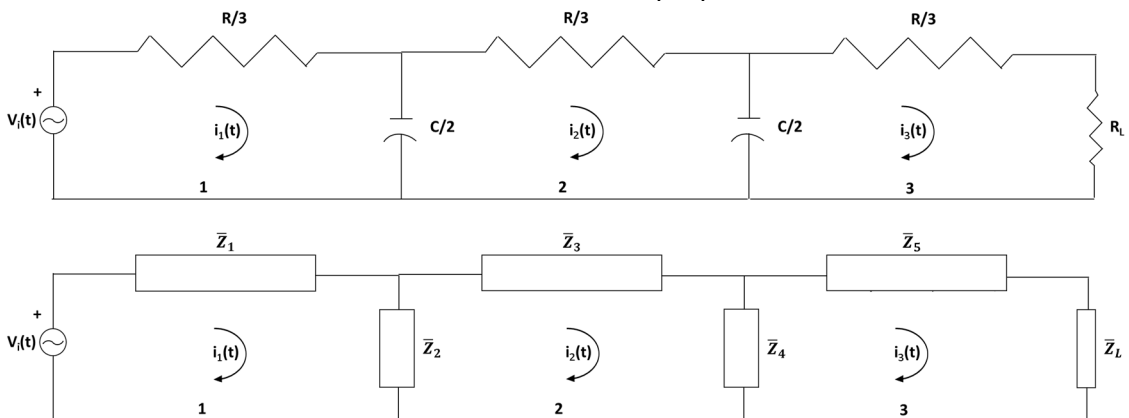
$$270^\circ = \frac{3}{2}\pi \text{ rad} \rightarrow 18 \text{ h}$$

$$180^\circ = \pi \text{ rad} \rightarrow 12 \text{ h}$$

$$90^\circ = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \rightarrow 6 \text{ h}$$

Para muros pesados la impedancia puede situarse en cualquiera de los otros 3 cuadrantes del mencionado plano. Esto significa que en el circuito eléctrico equivalente deben añadirse más celdas RC. En una aproximación de segundo orden el circuito eléctrico equivalente sería:

Figura 39. Circuito equivalente de segundo orden.  
Fuente: elaboración propia.



Resolviendo por el método de las mallas:

Malla 1:

$$v_i(t) = i_1(t)(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) - i_2(t)\bar{Z}_2 \quad \text{Ec. 100}$$

Malla 2:

$$0 = -i_1(t)\bar{Z}_2 + i_2(t)(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \bar{Z}_4) - i_3(t)\bar{Z}_4 \quad \text{Ec. 101}$$

Malla 3:

$$0 = -i_2(t)\bar{Z}_4 + i_3(t)(\bar{Z}_4 + \bar{Z}_5 + \bar{Z}_L) \quad \text{Ec. 102}$$

Suponiendo  $R \gg \omega L$ , luego  $\bar{Z}_5 \gg \bar{Z}_L$  y resolviendo el sistema de ecuaciones para  $i_3$  aplicando Sarrus y Cramer:

$$i_3(t) = \frac{\begin{vmatrix} \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 & -\bar{Z}_2 & v_i(t) \\ -\bar{Z}_2 & \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \bar{Z}_4 & 0 \\ 0 & -\bar{Z}_4 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 & -\bar{Z}_2 & 0 \\ -\bar{Z}_2 & \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \bar{Z}_4 & -\bar{Z}_4 \\ 0 & -\bar{Z}_4 & \bar{Z}_4 + \bar{Z}_5 \end{vmatrix}}$$

$$i_3(t) = \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_4 \cdot v_i(t)}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \bar{Z}_4)(\bar{Z}_4 + \bar{Z}_5) - \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_2(\bar{Z}_4 + \bar{Z}_5) - \bar{Z}_4 \cdot \bar{Z}_4(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad \text{Ec. 103}$$

$$\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_2 = \bar{Z}_4 \cdot \bar{Z}_4 = \left(-\frac{2j}{\omega \cdot C}\right) \left(-\frac{2j}{\omega \cdot C}\right) = \frac{4j^2}{(\omega \cdot C)^2} = \frac{4(\sqrt{-1})^2}{(\omega \cdot C)^2} = \frac{-4}{(\omega \cdot C)^2} \quad \text{Ec. 104}$$

$$\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 = \bar{Z}_4 + \bar{Z}_5 = \frac{R}{3} - \frac{j}{\omega \cdot \frac{C}{2}} = \frac{R}{3} - \frac{2j}{\omega \cdot C} \quad \text{Ec. 105}$$

$$\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \bar{Z}_4 = -\frac{2j}{\omega \cdot C} + \frac{R}{3} - \frac{2j}{\omega \cdot C} = \frac{R}{3} - \frac{4j}{\omega \cdot C} \quad \text{Ec. 106}$$

$$(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \bar{Z}_4)(\bar{Z}_4 + \bar{Z}_5) = \left(\frac{R}{3} - \frac{2j}{\omega \cdot C}\right) \left(\frac{R}{3} - \frac{4j}{\omega \cdot C}\right) \left(\frac{R}{3} - \frac{2j}{\omega \cdot C}\right) = \left(\frac{R}{3} - \frac{2j}{\omega \cdot C}\right)^2 \left(\frac{R}{3} - \frac{4j}{\omega \cdot C}\right)$$

$$\left(\frac{R}{3} - \frac{2j}{\omega \cdot C}\right)^2 = \frac{R^2}{9} + \frac{4j^2}{(\omega \cdot C)^2} - \frac{4Rj}{3\omega \cdot C} = \frac{R^2}{9} + \frac{4(\sqrt{-1})^2}{(\omega \cdot C)^2} - \frac{4Rj}{3\omega \cdot C} = \frac{R^2}{9} - \frac{4}{(\omega \cdot C)^2} - \frac{4Rj}{3\omega \cdot C}$$

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{R^2}{9} - \frac{4}{(\omega \cdot C)^2} - \frac{4Rj}{3\omega \cdot C}\right) \left(\frac{R}{3} - \frac{4j}{\omega \cdot C}\right) = \frac{R^3}{27} - \frac{4R}{3(\omega \cdot C)^2} - \frac{4R^2j}{9\omega \cdot C} - \frac{4R^2j}{9\omega \cdot C} + \frac{16j}{(\omega \cdot C)^3} + \frac{16Rj^2}{3(\omega \cdot C)^2} \\ &= \frac{R^3}{27} - \frac{4R}{3(\omega \cdot C)^2} + \frac{16R(\sqrt{-1})^2}{3(\omega \cdot C)^2} + j \left(\frac{16}{(\omega \cdot C)^3} - \frac{8R^2}{9\omega \cdot C}\right) \\ &= \frac{R^3}{27} - \frac{4R}{3(\omega \cdot C)^2} - \frac{16R}{3(\omega \cdot C)^2} + j \left(\frac{16}{(\omega \cdot C)^3} - \frac{8R^2}{9\omega \cdot C}\right) \\ &= \frac{R^3}{27} - \frac{20R}{3(\omega \cdot C)^2} + j \left(\frac{16}{(\omega \cdot C)^3} - \frac{8R^2}{9\omega \cdot C}\right) \end{aligned}$$

$$\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_2(\bar{Z}_4 + \bar{Z}_5) = \bar{Z}_4 \cdot \bar{Z}_4(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) = -\frac{4}{(\omega \cdot C)^2} \left( \frac{R}{3} - \frac{2j}{\omega \cdot C} \right) = -\frac{4R}{3(\omega \cdot C)^2} + \frac{8j}{(\omega \cdot C)^3}$$

$$\frac{-4}{(\omega \cdot C)^2} \cdot v_i(t)$$

$$i_3(t) = \frac{\frac{R^3}{27} - \frac{20R}{3(\omega \cdot C)^2} + j \left( \frac{16}{(\omega \cdot C)^3} - \frac{8R^2}{9\omega \cdot C} \right) - \left( -\frac{4R}{3(\omega \cdot C)^2} + \frac{8j}{(\omega \cdot C)^3} \right) - \left( -\frac{4R}{3(\omega \cdot C)^2} + \frac{8j}{(\omega \cdot C)^3} \right)}{\frac{-4}{(\omega \cdot C)^2} \cdot v_i(t)}$$

$$\frac{-4}{(\omega \cdot C)^2} \cdot v_i(t)$$

$$i_3(t) = \frac{\frac{R^3}{27} - \frac{20R}{3(\omega \cdot C)^2} + \frac{16j}{(\omega \cdot C)^3} - \frac{8R^2j}{9\omega \cdot C} + \frac{4R}{3(\omega \cdot C)^2} - \frac{8j}{(\omega \cdot C)^3} + \frac{4R}{3(\omega \cdot C)^2} - \frac{8j}{(\omega \cdot C)^3}}{\frac{-4}{(\omega \cdot C)^2} \cdot v_i(t)}$$

$$\frac{-4}{(\omega \cdot C)^2} \cdot v_i(t)$$

$$i_3(t) = \frac{\frac{R^3}{27} - \frac{4R}{(\omega \cdot C)^2} - \frac{8R^2j}{9\omega \cdot C}}{\frac{-4}{(\omega \cdot C)^2} \cdot v_i(t)}$$

De donde se obtiene:

$$\bar{Z} = \frac{\frac{R^3}{27} - \frac{4R}{(\omega \cdot C)^2} - \frac{8R^2j}{9\omega \cdot C}}{\frac{-4}{(\omega \cdot C)^2}} = -\frac{R^3(\omega \cdot C)^2}{108} + R + \frac{2R^2 \cdot \omega \cdot C}{9} j = R \left( 1 - \frac{(R \cdot \omega \cdot C)^2}{108} \right) + \frac{2R^2 \cdot \omega \cdot C}{9} j$$

$$Z = \sqrt{R^2 \left( 1 - \frac{(R \cdot \omega \cdot C)^2}{108} \right)^2 + \frac{4R^4 \omega^2 C^2}{81}} = R \left( \sqrt{\left( 1 - \frac{(R \cdot \omega \cdot C)^2}{108} \right)^2 + \left( \frac{2R\omega C}{9} \right)^2} \right) \text{ Ec. 107}$$

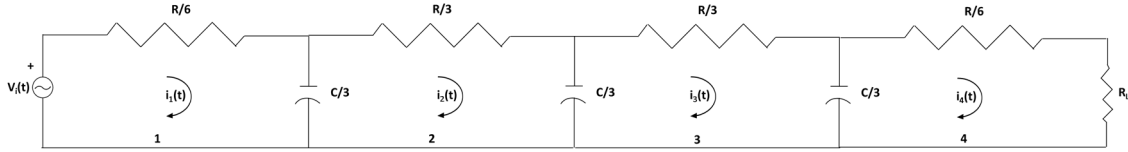
$$\delta_Z = \text{arc tg} \frac{\frac{2R^2 \cdot \omega \cdot C}{9}}{R \left( 1 - \frac{(R \cdot \omega \cdot C)^2}{108} \right)} = \text{arc tg} \frac{2R^2 \cdot \omega \cdot C}{9R \left( 1 - \frac{(R \cdot \omega \cdot C)^2}{108} \right)} \text{ Ec. 108}$$



En una aproximación de tercer orden el circuito eléctrico equivalente sería:

Figura 40. Circuito equivalente de tercer orden.

Fuente: elaboración propia.



Quedando determinado por un módulo  $[Z]$  ( $(m^2 \cdot K)/W$ ) y una fase  $(\delta)$ (rad), lo que permite filtrar aquellas ondas que convenga. Esto es: basándose en la analogía eléctrica, aplicando las leyes de Kirchhoff y para un paramento monocapa:

$$[Z] = R \sqrt{\left(1 - \frac{2}{3}B^2\right)^2 + \left(\frac{1}{12}(19B - B^3)\right)^2} \quad Ec. 109$$

$$\delta = \text{arc tg} \left[ \frac{\frac{1}{3}(19B - B^3)}{4 - \frac{8}{3}B^2} \right] \quad Ec. 110$$

donde:

$$B = \frac{\omega RC}{9} \quad Ec. 111$$

Recordando que  $R = \frac{L}{\lambda}$ ;  $C = c_p \cdot V \cdot \rho$  y que la difusividad ( $m^2/s$ )  $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ ; entonces:

$$B = \frac{\omega \frac{L}{\lambda} c_p \rho A L}{9} = \frac{\omega L^2 A}{9\alpha} \quad Ec. 112$$

Según (139) la analogía eléctrica resuelta por ordenador conocida por su acrónimo AERO está basada en la extensión al campo térmico de las leyes de Kirchhoff. Y se ha comprobado una desviación despreciable de los resultados que se obtienen con relación a la solución analítica. Por otra parte, se da una reducción de los problemas de convergencia respecto a otros métodos numéricos, en cada iteración se soluciona un sistema lineal cuyo número de ecuaciones coincide con el de incógnitas. Se observa que el error disminuye al reducir en cada una de las iteraciones de cálculo el intervalo de tiempo,  $\Delta T$ , y al discretizar el sistema aumentando el número de elementos de la malla. En otras palabras, al aumentar el número de elementos RC el error cometido es menor. Del análisis anterior se infiere que para cerramientos multicapa el estudio llega a convertirse en unos deberes de gran esfuerzo respecto a análisis matemático, lo cual se agiliza utilizando herramienta computacional sin pérdida razonable en la exactitud de resultados.

#### 6.3.4. Inercia térmica

La inercia es la resistencia que ofrece un cuerpo o sistema para cambiar de estado. En Física: un cuerpo tiene mayor inercia cuanto mayor es la dificultad para hacer que cambie de estado (142).

El término inercia térmica fue utilizado en (133) para describir la capacidad total de un edificio para almacenar y liberar calor. Dicho de otro modo, es la capacidad para almacenar energía térmica y liberarla de forma progresiva (142), es decir, como dice (129): "es la dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura". Cuanto mayor es la inercia térmica de un edificio más lenta es la velocidad a la que aumenta o baja su temperatura interior. En consecuencia, la inercia térmica de los materiales con los que se construye un edificio puede utilizarse para reducir el flujo de calor hacia el interior de las viviendas tipo de la R. D. lo que implica disminuir la demanda de equipos de refrigeración y su consecuente consumo eléctrico.

Para (143) la inercia térmica es la capacidad de almacenaje de energía interna: a altas temperaturas = calentamiento, a bajas temperaturas = enfriamiento. Utilizan la ecuación (125):

$$IT = \frac{L^2}{\alpha} \omega^\circ \quad \text{Ec. 113}$$

Donde:

IT = inercia térmica (adimensional).

$\alpha$  = difusividad, m<sup>2</sup>/s.

L = espesor, m.

$\omega^\circ$  = velocidad angular media de la rotación terrestre alrededor de su eje (ángulo horario):  $2\pi/24 \text{ h} = 15^\circ/\text{h}$

La inercia térmica es el fenómeno que establece la diferencia entre la consideración del régimen estacionario y el dinámico (variable o transitorio). Conlleva los siguientes aspectos en cuanto al ahorro energético (125):

- Capacidad de almacenar energía.
- Velocidad de carga y descarga.

En los cerramientos sin capa de aislamiento como sucede en las viviendas tipo de la R. D. el fenómeno es reversible porque puede percibir energía por ambas caras del muro. Como establece el Principio Cero de la Termodinámica los paramentos acumulan energía térmica cuando su temperatura sea menor que la del ambiente, por lo tanto, absorberán energía del ambiente interior del recinto siempre que en el interior exista una temperatura mayor a la del muro y es una desventaja que este calor se transfiera al exterior (en algunas zonas climáticas). También, en algunas zonas climáticas, como sucede en la R. D., es una desventaja que luego se transmita el calor del muro hacia el interior. Por esto es importante saber si la onda térmica se refleja o se filtra en el cerramiento (125).

Como se ha comentado anteriormente, el fenómeno de transferencia de calor que se lleva cabo en cualquier cuerpo no depende solo de la resistencia o conductividad del material sino, fundamentalmente, de la diferencia de

temperatura entre ambas caras de este. No obstante, esta diferencia cambia durante transcurre el día. Con una variación significativa cuando la radiación solar incide en los muros, ya que se produce un incremento de temperatura ficticio superior a la temperatura del ambiente exterior que se conoce como temperatura sol-aire y cuando el sol ya no incide se produce una disminución rápida. Esto lleva a cabo una variación de temperatura significativa entre la cara interior y exterior durante el transcurso del día lo que lleva al análisis de régimen dinámico (125).

El régimen dinámico obliga para tener en cuenta el factor tiempo en el análisis de transferencia de calor. Dos fenómenos que se desprenden de este punto son el desfase y amortiguamiento de la onda térmica (125) (142).

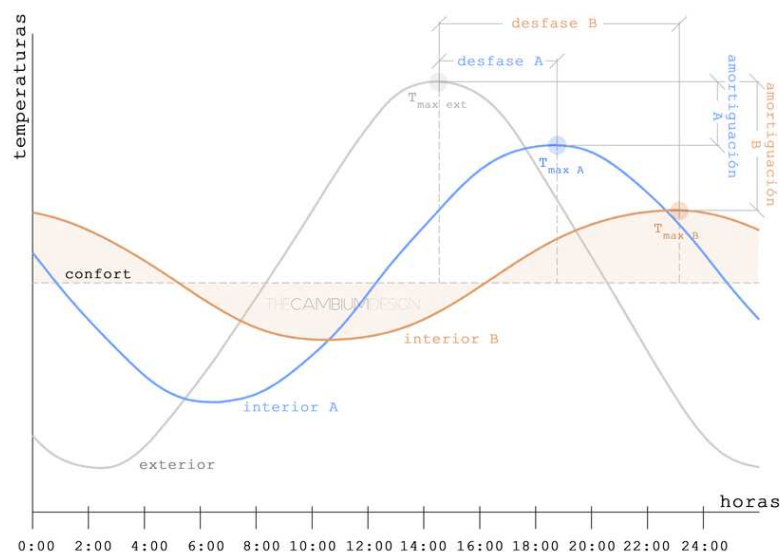
#### 6.3.4.1. Desfase de la onda térmica

Los cerramientos están sometidos a las condiciones ambientales como a sus oscilaciones diarias lo que hace que se produzca una transferencia de energía en régimen dinámico, produciéndose un retraso y a la vez un amortiguamiento de la onda de temperatura que penetra desde el exterior hacia el interior. Resulta interesante que el pico de máxima temperatura que llega al interior del edificio presente un desfase suficiente como para poder ventilar nocturnamente la vivienda cuando las temperaturas son menores que en el día (124) (9) (144).

El desfase es un retardo de la temperatura en la cara interior del cerramiento respecto a la exterior. Cuando la capa más exterior se calienta por el efecto combinado entre la radiación solar incidente y la temperatura ambiente exterior se da paso a la transmisión del calor desde esta capa hacia el interior del muro. Pero dependiendo de las propiedades térmicas del muro en cuestión esta transferencia de calor tomara mayor o menor tiempo en atravesar el muro, a este tiempo que se tarda se le llama desfase. La variación de la temperatura en la cara exterior presenta un valor máximo en un momento específico del día que va en función de la localización y orientación del cerramiento pero que debido al desfase provocado por el muro ese pico de temperatura exterior no se refleja en el mismo instante en el interior (9) (124) (126) (129) (142).

Figura 41. Desfase y amortiguamiento de la onda térmica.

(<http://www.thecambiumdesign.com/wp-content/uploads/2016/11/Amortiguacion-onda.png>)



Este desfase ( $\phi$ ) depende de las siguientes propiedades: conductividad térmica ( $\lambda$ ), densidad ( $\rho$ ), espesor ( $L$ ), calor específico ( $c_p$ ) y del periodo del fenómeno ( $T$ ) (124) (129).

Para un muro homogéneo el desfase se obtiene con la siguiente ecuación (9) (125) (129) (142):

$$\phi = \frac{T}{2} \left( \sqrt{\frac{\rho \cdot c_p}{\lambda \cdot \pi \cdot T}} \cdot L \right) = \frac{L}{2} \left( \sqrt{\frac{\rho \cdot c_p \cdot T}{\lambda \cdot \pi}} \right) \quad \text{Ec. 114}$$

En unidades del SI:

$$\phi = 0,53 \cdot \frac{T}{2} \left( \sqrt{\frac{\rho \cdot c_p}{\lambda \cdot \pi \cdot T}} \cdot L \right) \quad \text{Ec. 115}$$

Si se tiene en cuenta que el fenómeno es la radiación solar, cuyo período es de 24 horas, se tiene:

$$\phi = 1,382 \cdot \frac{L}{\lambda} \left( \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c_p} \right) \quad \text{Ec. 116}$$

El producto  $\rho \cdot \lambda \cdot c_p$  es la admisividad ( $B$ ) del material.

Si el muro está compuesto por más de una capa, el desfase equivalente se define de la siguiente forma (9):

$$\phi = \frac{T}{2} \cdot R_{eq} \left( \sqrt{\frac{B}{\pi \cdot T}} \right) = 1,382 R_{eq} \cdot \sqrt{B} \quad \text{Ec. 117}$$

Donde:

$R_{eq}$  es la resistencia térmica equivalente:

$$R_{eq} = \sum_1^n \frac{L_i}{\lambda_i} \quad \text{Ec. 118}$$

$B = \lambda \cdot \rho \cdot c_p$  es la admisividad equivalente, y la expresión correspondiente es:

$$B = \frac{1}{R_{eq}} \left\{ 1,1 \sum_1^{n-1} \left( \frac{L_i}{\lambda_i} \lambda_i \rho_i c_i \right) + \lambda_n \rho_n c_n \left[ \frac{L_n}{\lambda_n} - 0,1 \sum_1^{n-1} \frac{L_i}{\lambda_i} \right] \right\} \quad \text{Ec. 119}$$

“Expresión empírica en la que, en condiciones de flujo del exterior al interior,  $n$  es la capa externa de la pared compuesta. Si la expresión entre corchetes del segundo término es negativa (lo que ocurre cuando la resistencia térmica de la capa exterior es pequeña en relación con las otras capas), ésta debe considerarse cero; y si una de las capas es una cámara de aire, el término  $\lambda \cdot \rho \cdot c$  de esta capa debe ser considerado nulo” (145).

El fenómeno de transferencia de calor por los acristalados es casi instantáneo, y lento por los paramentos opacos, por lo tanto, conviene que el desfase en los opacos sea lo mayor posible para no tener las cargas térmicas en el interior al mismo tiempo (129).

En definitiva, el retraso de fase determina cuánto tiempo tarda el calor en atravesar un espesor determinado de un material.

#### 6.3.4.2. Amortiguamiento de la onda térmica

El desfase no es el único factor que se revela en los paramentos como consecuencia del régimen dinámico. Mientras el calor se transmite por el cerramiento, las condiciones del ambiente en el exterior cambian: baja la temperatura y la radiación solar va disminuyendo su incidencia en las fachadas y su intensidad hasta el momento que el sol se oculta. Esto lleva consigo que una cantidad de calor que se había almacenado en el cerramiento se disipe hacia el exterior, conduciendo esto a un rebote de la onda de calor. A este efecto se le llama amortiguación de la onda térmica que se expresa en porcentaje como factor de amortiguamiento ( $f_a$ ) (129).

$$f_a = 1 - \mu \quad \text{Ec. 120}$$

$$\mu = \exp\left(-L\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda \cdot T}}\right)\right) \quad \text{Ec. 121}$$

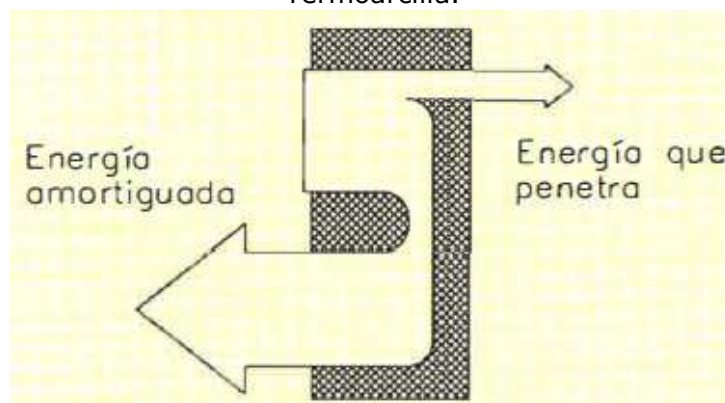
$$f_a = 1 - \exp\left(-L\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda \cdot T}}\right)\right) \quad \text{Ec. 122}$$

$f_a$  = reducción que experimentada la onda térmica incidente al pasar al interior (en %).

$\mu$  = amortiguamiento (tanto por uno).

Figura 42. Amortiguación de la onda térmica.

Fuente: El comportamiento térmico y la inercia térmica de las fábricas con bloques Termoarcilla.



El amortiguamiento de la onda térmica, que depende de los mismos parámetros que depende el desfase, es un valor que suele ser elevado generalmente  $>60\%$ . El amortiguamiento también se define como la relación entre la amplitud de la onda de temperatura en la cara exterior ( $\theta_o$ ) y la registrada en la cara interior ( $\theta_i$ ), en un muro homogéneo se calcula mediante las siguientes expresiones (9) (124) (125) (129) (142):

$$\mu = \frac{\theta_i}{\theta_o} \quad \text{Ec. 123}$$

$$\mu = \frac{\theta_i}{\theta_o} = \exp\left(-L\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda \cdot T}}\right)\right) \quad \text{Ec. 124}$$

Si se tiene en cuenta que el fenómeno es la radiación solar, cuyo período es de 24 horas, se tiene:

En función de la resistencia térmica ( $R = \frac{L}{\lambda}$ ) y de la admisividad ( $B = \lambda \cdot \rho \cdot c_p$ ) (9):

$$\mu = \frac{\theta_i}{\theta_o} = \exp\left(-L\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda \cdot T}}\right)\right) = \exp\left(-0,362 \frac{L}{\lambda} \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c_p}\right) = \exp(-0,362R \cdot \sqrt{B}) \quad \text{Ec. 125}$$

En función de la difusividad  $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$  (125):

$$\mu = \frac{\theta_i}{\theta_o} = \exp\left(-L\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda \cdot T}}\right)\right) = \exp\left(-L\left(\frac{0,131}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \quad \text{Ec. 126}$$

La amplitud ( $\theta$ ) es la diferencia entre la temperatura máxima o mínima y la temperatura media. Aplicado a las caras interior y exterior del muro se tiene:

Amplitud en la cara exterior ( $\theta_o$ ) (9):

$$\theta_o = t_{m\acute{a}x.,e} - t_{med.,e} = t_{m\acute{a}x.,e} - \frac{t_{m\acute{a}x.,e} + t_{m\acute{i}n.,e}}{2} = \frac{t_{m\acute{a}x.,e} - t_{m\acute{i}n.,e}}{2} \quad \text{Ec. 127}$$

Amplitud en la cara interior ( $\theta_i$ ):

$$\begin{aligned} \theta_i &= t_{m\acute{a}x.,i} - t_{med.,i} = t_{m\acute{a}x.,i} - \frac{t_{m\acute{a}x.,i} + t_{m\acute{i}n.,i}}{2} = \frac{t_{m\acute{a}x.,i} - t_{m\acute{i}n.,i}}{2} \\ &= \mu \theta_o = \mu (t_{m\acute{a}x.,e} - t_{med.,e}) = \mu t_{m\acute{a}x.,e} - \mu t_{med.,e} \quad \text{Ec. 128} \end{aligned}$$

Si el muro está compuesto por más de una capa, el amortiguamiento equivalente se define de la siguiente forma (9):

$$\mu = \frac{\theta_i}{\theta_o} = \exp\left(-R_{eq}\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot B}{T}}\right)\right) = \exp(-0,362R_{eq} \cdot \sqrt{B}) \quad \text{Ec. 129}$$

Se puede ver que la amplitud de la onda armónica decrece de forma exponencial con el espesor del cerramiento (125).

#### 6.3.4.3. Coeficiente de estabilidad térmica

Las edificaciones se ven afectadas por las variaciones climáticas del ambiente: día-noche, invierno-verano, calor-frío, y por la condición de uso en el interior: encendido-apagado de los equipos de acondicionamiento, abrir-cerrar ventanas, ocupado-desocupado, mayor-menor ocupación. Todo esto conlleva a que la temperatura interior varíe constantemente, que a veces, puede ser compensada poniendo en funcionamiento equipos de acondicionamiento con su consecuente gasto de energía. El objetivo que se desea alcanzar, desde el punto de vista del confort es que la temperatura se mantenga dentro de los márgenes de bienestar con fluctuaciones leves, con el menor consumo de energía posible. Este fenómeno se denomina estabilidad térmica (129).

La estabilidad térmica es uno de los objetivos que se desea conseguir en un edificio y la inercia térmica ayuda a alcanzar dicho objetivo. La estabilidad térmica se mide con un coeficiente que relaciona la amplitud de la temperatura interior con la amplitud de la temperatura exterior (125) (129).

$$C. e. t. = \frac{\text{Amplitud de temperaturas interiores}}{\text{Amplitud de temperaturas exteriores}} = \frac{\theta_i}{\theta_o} = \mu \quad \text{Ec. 130}$$

Donde los valores cercanos a 1 indican que el local no tiene inercia térmica y que cualquier variación energética (exterior o interior) se refleja inmediatamente en el ambiente interior; los valores por debajo de 0,5 indican edificios muy estables, es decir, poco dispuestos a cambiar de temperatura, ver tabla siguiente.

Tabla 41. Valores de comparación del c.e.t.

Fuente: El comportamiento térmico y la inercia térmica de las fábricas con bloques Termoarcilla.

<b>COEFICIENTE DE ESTABILIDAD TÉRMICA (c.e.t.)</b>	
<b>C. e. t. &gt;1</b>	Local donde los efectos del sobrecalentamiento son críticos .
<b>C. e. t. = 1,0</b>	La temperatura varía en el interior al mismo ritmo que en el exterior.
<b>C. e. t. entre 1,0 y 0,5</b>	Local sin inercia térmica.
<b>C. e. t. &lt;0,5</b>	Local con inercia térmica. Repercute en el local menos del 50 % de la fluctuación de la temperatura exterior.

Figura 43. Edificio sin inercia térmica.

Fuente: El comportamiento térmico y la inercia térmica de las fábricas con bloques Termoarcilla.

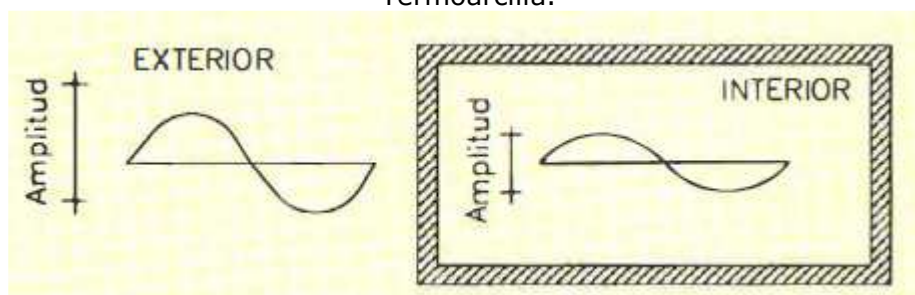
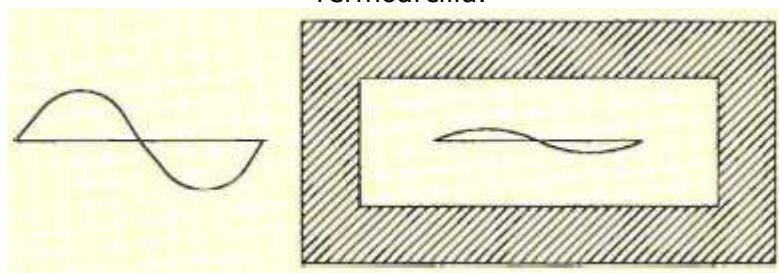


Figura 44. Edificio con inercia térmica.

Fuente: El comportamiento térmico y la inercia térmica de las fábricas con bloques Termoarcilla.



La inercia, la amortiguación y el desfase de la onda térmica son inversamente proporcionales a la difusividad (y a la efusividad). Si la difusividad aumenta la inercia disminuye (125).

Existe la tendencia de que la estabilidad térmica beneficia la eficiencia energética en un edificio pero, en usos esporádicos puede interesar almacenar o liberar energía a través de los cerramientos sobre todo en climas con importantes variaciones en la temperatura. Suponiendo un clima con temperatura que oscila alrededor de la temperatura templada, en un edificio de uso continuo el objetivo será reducir la difusividad. Sin embargo, en un edificio de uso esporádico a determinadas horas del día, conviene estudiar la diferencia horaria entre las ondas térmicas generadas en el exterior y las necesidades energéticas internas para desfasar la onda y aumentar o disminuir la difusividad según convenga. A la hora de diseñar el edificio, se necesita conocer la  $\lambda$  para estimar la modulación de la onda térmica (124) (125).

### 6.3.5. Masa útil

Anteriormente se ha comentado que el cerramiento intercambia energía térmica con el interior y exterior. Pero no toda la masa del muro intercambia calor con el interior como tampoco toda la masa intercambia con el exterior. En los cerramientos que tienen varias capas el aislamiento divide el muro en dos zonas: una en contacto directo con el interior y otra en contacto con el exterior. No obstante, en los cerramientos monocapa la división no queda bien definida (125) (129).

Si un cuerpo tiene una masa térmica grande no indica que sea suficiente para intervenir en la estabilidad térmica de la estancia. Los cuerpos con gran masa deben cargarse de energía para actuar como volantes de inercia. Cada cuerpo se carga con mayor o menor facilidad que otro. Por ejemplo, un fluido se carga mejor que un sólido, porque en el fluido la convección que se produce en su seno permite utilizar la masa total para ese fin. Mientras que el sólido se calienta por conducción, el cual es un mecanismo más lento, y establece gradiente térmico. El mar, que acumula por convección, actúa de forma más eficiente que una cadena montañosa; motivo por el cual la temperatura en las costas es más estable que en el interior. Sin embargo, cuando un sólido se encuentra totalmente envuelto por el ambiente que lo va a cargar de energía no se establece gradiente aunque su calentamiento sea lento. Es lo que ocurre con las particiones internas del edificio. Pero cuando se trata de un muro exterior se establece inevitablemente un gradiente que disminuye su capacidad de acumular calor muy por debajo de su masa térmica, ya que no puede alcanzar en toda su masa igual temperatura (129).

Un muro con poca inercia se debe a la utilización de materiales aislantes. Esto se debe a la colocación del material aislante cerca del ambiente interior, lo que disminuye de forma considerable la aportación como acumulador de lámina exterior, que suele ser la pesada. Un cerramiento con masa térmica grande si se le coloca material aislante por la cara interior se comporta como si fuera un muro ligero sin capacidad efectiva de almacenamiento. Para que un material aporte su inercia a la estabilidad térmica del recinto se necesita que esté localizado dentro de él o si se trata de un cerramiento exterior que su masa esté en contacto directo con el ambiente interior, es decir un cerramiento sin aislar o con el aislamiento en la cara exterior (129).



Por lo tanto, la masa útil (masa térmica efectiva) hace referencia a la masa de los muros que puede intercambiar energía con el ambiente interior siendo esta la que realmente debe utilizarse para el análisis de la inercia de un recinto (125) (142).

Si se quiere conseguir estabilidad térmica en un edificio se debe colocar el aislamiento por la cara exterior. Ahora bien, si se busca una rápida climatización se debe colocar el aislamiento por el lado interior (124) (125) (129) (142).

Además, debe tomarse en cuenta la orientación de las fachadas y los huecos que permiten la radiación solar directa al interior de las estancias para aprovecharlo según convenga para cargar o descargar de energía los cerramientos (124) (125) (129) (142).

### 6.3.6. La admitancia térmica

La admitancia térmica que también se denomina coeficiente de acumulación térmica, se representa por la letra S o Y (dependiendo de la escuela) es un parámetro calculable para cada una de las capas que conforman un muro. Representa la potencia energética necesaria para hacer oscilar un grado la temperatura interna. Valores altos indican potencias altas para aumentar la temperatura del local. Este parámetro es utilizado por el CIBSE y el Instituto Torroja de la Construcción y el Cemento (126) (142).

En (142) define este parámetro: "como la proporción de flujo de calor entre la superficie interna de la construcción y la temperatura del espacio, para cada grado de oscilación en la temperatura del espacio sobre su valor medio. Vendría a ser un valor U cíclico para el flujo de calor entre el espacio y los cerramientos".

Los materiales que tienen mayor influencia en la admitancia son aquellos cercanos al interior, es decir, los que conforman la masa útil (125).

El Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento (IETCC), citado por (125) y (142), para su cálculo parte de la siguiente expresión que combina las propiedades: conductividad térmica ( $\lambda$ ), densidad ( $\rho$ ), calor específico ( $c_p$ ) y resistencia térmica ( $R$ ) considerando un periodo de 24 h:

$$S_{24} = 8,48 \cdot 10^{-3} \left( \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \right) \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \text{ Ec. 131}$$

En función de la efusividad ( $b = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho}$ ):

$$S_{24} = 8,48 \cdot 10^{-3} b \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \text{ Ec. 132}$$

A partir de la expresión anterior se calcula el índice de inercia térmica ( $D$ , adimensional) (125) (142):

$$D = R \cdot S_{24} \text{ Ec. 133}$$

Este índice permite que la inercia térmica se pueda tomar como una propiedad de los materiales y de esa forma poder compararlos entre sí. A su vez, después que se ha determinado que un cerramiento es adecuado energéticamente para una vivienda este índice permite elegir materiales equivalentes energéticamente que sean más favorables a otros niveles: en cuanto reciclaje, ciclo de vida, procedencia, etc. (125) (142).

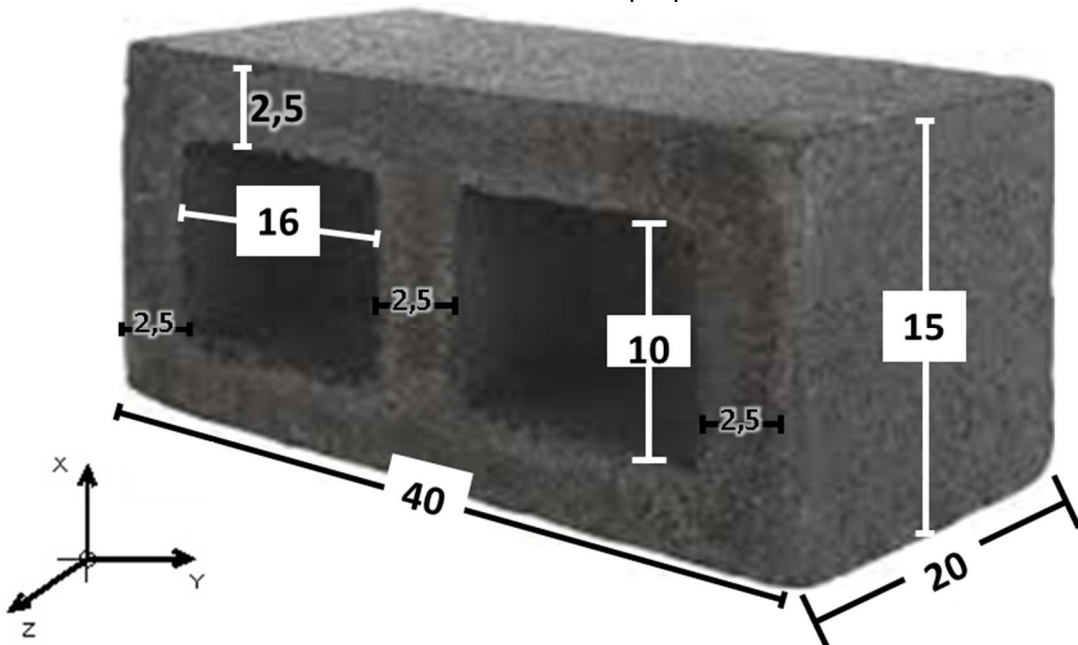
## 7. Estudio del comportamiento térmico de los bloques de concretos

### 7.1. Introducción

En la R. D. la inmensa mayoría de las viviendas se construyen con bloques de hormigón vibrados (en lo sucesivo bloques de concreto hueco). Estos bloques debido a su baja resistencia térmica provocan que en el clima tropical del caribe se den elevadas ganancias de calor lo cual empeora las condiciones de habitabilidad en el interior de las viviendas manteniéndolas fuera de la zona de confort (146).

Las medidas más habituales de los bloques de concreto utilizados en la construcción de viviendas en la R. D. son de 10 cm · 20 cm · 40 cm; 15 cm · 20 cm · 40 cm y 20 cm · 20 cm · 40 cm (40). Además, dichos bloques tienen dos cavidades huecas interiores de 7 cm · 16 cm y de 10 cm · 16 cm (146).

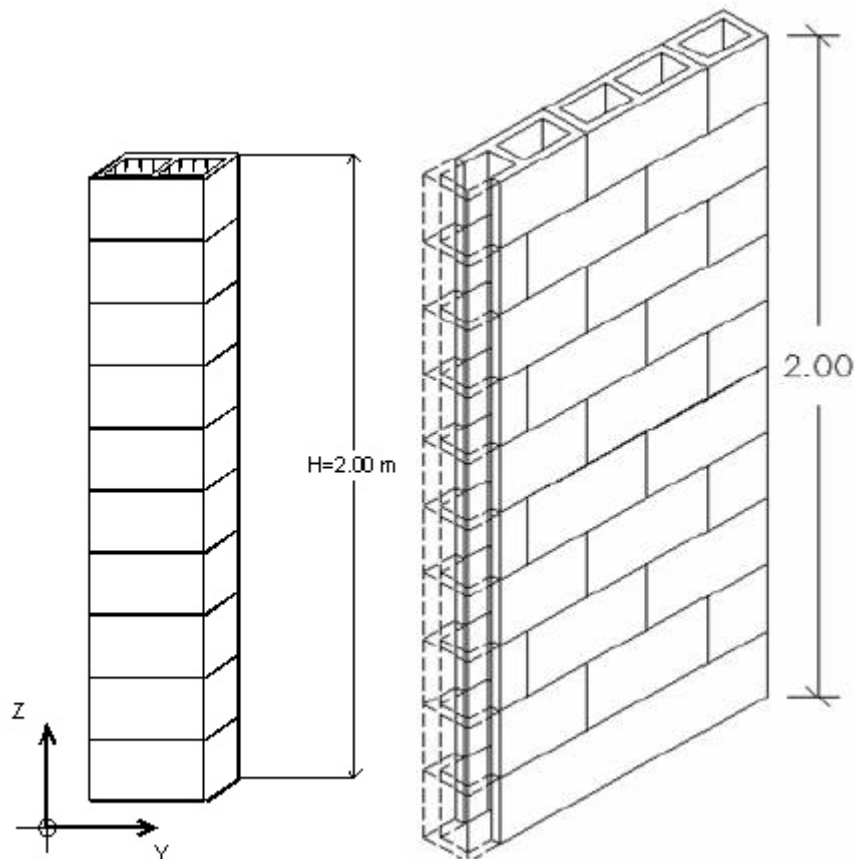
Figura 45. Medidas en un bloque de concreto hueco (cm).  
Fuente: elaboración propia.



Los bloques, al fabricar los muros, forman cavidades alargadas verticales con forma de conductos y cuya altura mínima es de dos metros, sin considerar la junta de mortero. La sección transversal máxima es de 7 cm · 16 cm para bloques de 12 cm de ancho y de 10 cm · 16 cm para bloques de 15 cm (146).

Figura 46. Cavidades alargadas verticales formadas al fabricar muros con bloques de concreto hueco.

Fuente: Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico.



Para determinar la resistencia térmica de muros contruidos con bloques huecos, deben considerarse los mecanismos de transferencia de calor por conducción a través del concreto, así como la convección natural y radiación en las cavidades (146) (147).

Existen varios estudios sobre la resistencia térmica en muros de mampostería. En (148) determinó mediante el método de elementos finitos que la resistencia térmica para las dimensiones y configuraciones mencionadas se situaba en  $0,250 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . Por otra parte, en (149) determinaron experimentalmente la resistencia térmica en un muro de bloques de concreto hueco de 15 cm de ancho. Para ello se basaron en la prueba ASTM C 518-76 obteniendo el valor de  $0,331 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$  sin considerar la influencia del mortero y de  $0,361 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$  cuando los bloques se unían mediante juntas de mortero.

En (150) efectuaron un estudio teórico en ladrillos de terracota hueco poniéndose de manifiesto que al incrementarse la diferencia de temperatura disminuía la resistencia térmica. En (151) puso de manifiesto que los huecos llenos de aire de un bloque contribuyen a la transferencia de calor, encontrando que esta se reduce hasta un 36 % si estos se rellenan con poliestireno común. En (152) llevaron a cabo un estudio experimental a fin de determinar la resistencia térmica de un muro construido con bloques de concreto hueco de  $12 \text{ cm} \cdot 20 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}$ . La altura de dicho muro era de 2,00 m y su anchura de 1,60 m, las condiciones

ambientales se correspondían con las de la ciudad Hermosillo perteneciente al estado federal de Sonora. La resistencia térmica promedio obtenida para condiciones ambientales de sobrecalentamiento fue de  $0,174 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ .

Con la disminución de la resistencia térmica de un muro de bloque de concreto hueco con el aumento de la diferencia de temperaturas cabe preguntarse cuál sería el comportamiento de dicha resistencia térmica al utilizar aislamiento térmico de diversas maneras en un muro de bloques de concreto hueco.

## 7.2. Transferencia de calor a través de un muro de bloques de concreto huecos

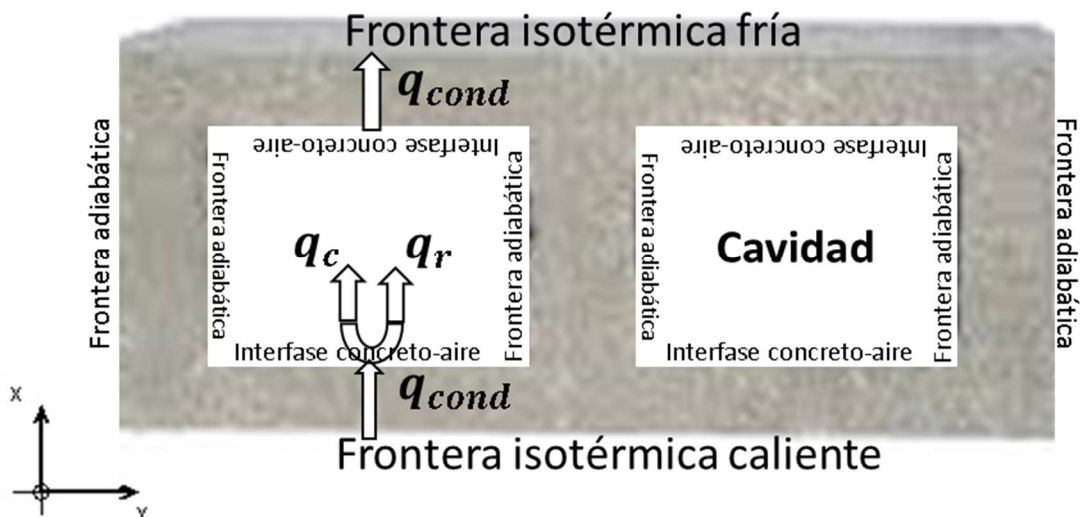
### 7.2.1. Modelo matemático

#### 7.2.1.1. Hipótesis de partida

La transferencia de calor a través de un paramento construido con bloques de concreto huecos es tridimensional. Existen fronteras en contactos con ambientes distintos y una de ellas con variación de sus propiedades termodinámicas a lo largo del tiempo. A fin de efectuar la solución numérica del problema se establecen las siguientes hipótesis (146):

1. La transferencia de calor es en régimen permanente.
2. Dicha transferencia de calor se resuelve de forma bidimensional para la conducción y convección y unidimensional en el caso de la radiación.
3. La frontera fría y la caliente se consideran isotérmicas, todas las demás adiabáticas (fig. 48).
4. La conductividad térmica del concreto se considera uniforme y constante (medio isotrópico).

Figura 47. Transporte de calor y condiciones de frontera en bloque de concreto hueco.  
Fuente: elaboración propia.



### 7.2.1.2. Ecuaciones de Laplace

En régimen estacionario, sin fuentes ni sumideros de calor y con la conductividad térmica constante la ecuación de calor bidimensional adquiere la forma de la ecuación siguiente (146) (153) (154):

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Ec. 134}$$

$T(x, y)$  es una función armónica y la ecuación anterior se denomina ecuación de Laplace.

La ecuación anterior es una ecuación diferencial parcial que se clasifica como lineal de segundo orden. Las ecuaciones diferenciales parciales pueden resolverse por métodos analíticos, numéricos o gráficos. Para encontrar una solución a esta ecuación se necesita especificar las condiciones iniciales y las condiciones de fronteras. Así, resolver una ecuación diferencial parcial sujeta a condiciones iniciales y condiciones de fronteras constituye un problema con valores en la frontera, que en el caso de nuestra ecuación consiste en determinar una función armónica en cierta región del plano conociendo los valores que la misma toma en la frontera de dicha región. Es decir, es un problema de Dirichlet (154).

La solución de la ecuación bidimensional proporciona el campo de temperaturas en un cuerpo bidimensional como función de las dos coordenadas espaciales independientes  $x$  e  $y$ .

### 7.2.1.3. Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor puede calcularse después a partir de las ecuaciones de Fourier presentadas a continuación (146) (147) (153):

$$q_x = -\lambda A_x \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \quad \text{Ec. 135}$$

$$q_y = -\lambda A_y \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \quad \text{Ec. 136}$$

Donde:

$q_x$  = transferencia de calor según la dirección  $x$ , en W.

$q_y$  = transferencia de calor según la dirección  $y$ , en W.

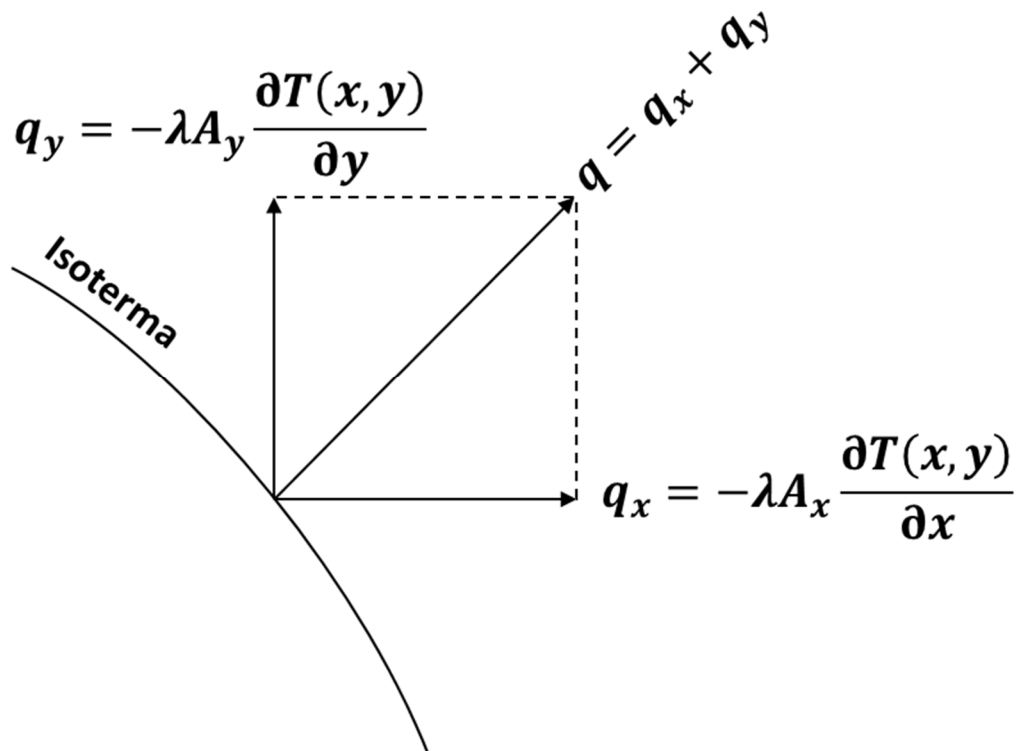
$\lambda$  = conductividad térmica del material en W/(m·K).

$A$  = área de la superficie en m<sup>2</sup>.

$\frac{\partial T(x, y)}{\partial x}$  = gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor.

Estas transferencias de calor se dirigen en las direcciones  $x$  o  $y$ . La transferencia total de calor en cualquier punto del material es la resultante de  $q_x$  y  $q_y$  en dicho punto. Por consiguiente, como muestra la figura 49, el vector de transferencia total de calor tendrá una dirección perpendicular a las isotermas en el material (153). En el caso del bloque de concreto será perpendicular a la frontera fría y a la caliente ya que son isotérmicas como se muestra en la figura 48.

Figura 48. Transferencia de calor por conducción en dos dimensiones.  
Fuente: elaboración propia.



#### 7.2.1.4. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección natural en la cavidad del bloque se determina con la ley de enfriamiento de Newton (ecuación siguiente) considerando que dicha cavidad es un espacio cerrado de forma rectangular vertical y el aire se comporta como un fluido térmico como se muestra en la figura 50. (146)

$$q_c = h_c A (T_c - T_f) \text{ Ec. 137}$$

Donde:

$q_c$  = transferencia de calor por convección en W.

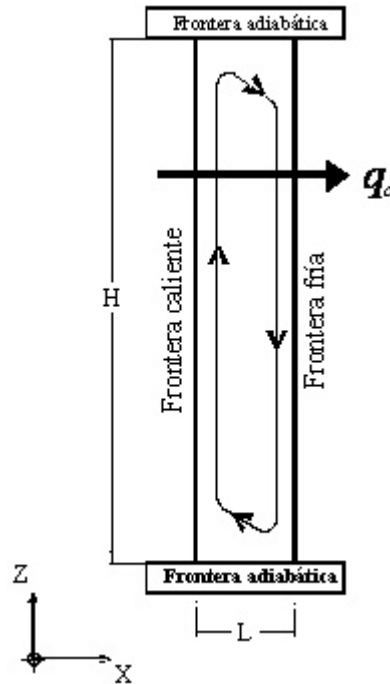
$h_c$  = coeficiente convectivo  $W/(m^2 \cdot K)$ .

$A$  = área de la superficie en  $m^2$ .

$T_c$  = temperatura frontera caliente en K.

$T_f$  = temperatura frontera fría en K.

Figura 49. Transferencia de calor por convección natural en la cavidad del bloque.  
 Fuente: Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico.



El coeficiente convectivo  $h_c$  se obtiene con la ecuación siguiente deducida a partir de la definición del número adimensional de Nusselt:

$$Nu = \frac{\text{Transf. de calor por convección}}{\text{Transf. de calor por conducción}} = \frac{h_c(T_c - T_f)}{\frac{\lambda(T_c - T_f)}{L}} = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} \Rightarrow h_c = \frac{\lambda \cdot Nu}{L} \quad \text{Ec. 138}$$

Donde:

$\lambda$  = conductividad térmica del aire en W/(m·K).

$Nu$  = número adimensional de Nusselt.

$L$  = Longitud característica en m. En el caso de la cavidad del bloque de concreto hueco corresponde a la distancia entre las caras del bloque como queda expresado en la figura 50.

Para determinar el número de Nusselt deben utilizarse las correlaciones de ElSherbiny (146) (155) que se muestran a continuación:

$$Nu_1 = 0.0605 Ra^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 139}$$

$$Nu_2 = \left[ 1 + \left\{ \frac{0.104 Ra^{0.293}}{1 + \left(\frac{6310}{Ra}\right)^{1.36}} \right\}^{\frac{1}{3}} \right] \quad \text{Ec. 140}$$

$$Nu_3 = 0.242 \left(\frac{Ra}{A}\right)^{0.272} \quad \text{Ec. 141}$$

$$Nu = [Nu_1, Nu_2, Nu_3]_{\text{máx.}} \quad \text{Ec. 142}$$

Donde:

$Nu$  = número adimensional de Nusselt.

$Ra$  = número adimensional de Rayleigh,  $Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$

$g$  = aceleración de la gravedad.

$\beta$  = coeficiente de expansión térmica del aire.

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre placas ( $T_c - T_f$ ).

$L$  = espesor capa de aire.

$\nu$  = viscosidad cinemática del aire.

$\alpha$  = difusividad térmica del aire.

$A$  = relación de aspecto,  $\frac{H}{L}$  ( $H$  = altura y  $L$  = espesor capa de aire).

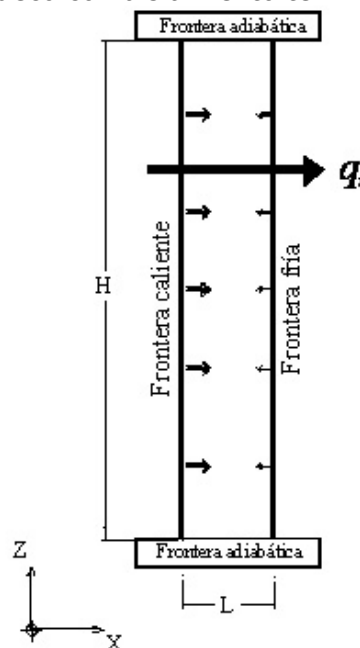
En las ecuaciones anteriores, se debe utilizar el valor máximo de  $Nu_1$ ,  $Nu_2$  y  $Nu_3$ . Los datos concuerdan con la ecuación 143 dentro del 9 por ciento (desviación máxima) y con una desviación estándar del 3,6 por ciento. No se afirma que la ecuación 143 sea válida más allá del rango experimental de mediciones ( $A = 5 - 110$  y  $Ra = 10 - 10^8$ ). (155)

En esta correlación (ec. 143) de ElSherbiny las propiedades termofísicas del fluido deben evaluarse a la temperatura promedio de la cavidad del bloque de concreto hueco.

#### 7.2.1.5. Transferencia de calor por radiación

La transferencia de calor por radiación en las cavidades del bloque de concreto hueco se resuelve considerando el intercambio de calor por radiación entre dos planos paralelos infinitos cuyas superficies ( $A$ ) son iguales. El factor de forma ( $F_{12}$ ) de radiación es la unidad, debido a que toda la radiación que sale de un plano llega al otro (153). La figura siguiente muestra un esquema de transferencia de calor por radiación.

Figura 50. Esquema transferencia de calor por radiación en una cavidad cerrada.  
Fuente: Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico.





En el caso de la transferencia de calor por radiación entre dos planos paralelos infinitos  $A_1 = A_2 = A$  y  $F_{12} = 1,0$ . En el caso de la cavidad del bloque de concreto hueco las emisividades son iguales ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ ) ya que los dos planos paralelos son del mismo material. Entonces, el calor transferido por radiación ( $q_r$ ) se obtiene de la siguiente forma ( $\sigma =$  constante de Stefan-Boltzmann) (153), a partir de la ecuación siguiente:

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad \text{Ec. 143}$$

Sustituyendo  $A_1 = A_2 = A$  y  $F_{12} = 1,0$ :

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A} + \frac{1}{A} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1 A} - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A} + \frac{1}{A} + \frac{1}{\varepsilon_2 A} - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1 A} - \frac{1}{A} + \frac{1}{A} + \frac{1}{\varepsilon_2 A} - \frac{1}{A}}$$

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1 A} + \frac{1}{\varepsilon_2 A} - \frac{1}{A}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{A} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

$$q_r = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \rightarrow \frac{q_r}{A} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \text{Ec. 144}$$

Sustituyendo  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$  la ec. anterior se convierte en la ec. siguiente:

$$q_r = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1}$$

$$q_r = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{2}{\varepsilon} - 1} \quad \text{Ec. 145}$$

Los problemas de transferencia de calor por radiación y convección están a menudo estrechamente asociados, y con frecuencia, lo que se busca es el calor total transferido por ambas formas. Por eso, es importante poner ambos procesos en una base común estableciendo un coeficiente de transferencia de calor por radiación ( $h_r$ ) análogo al coeficiente convectivo ( $h_c$ ) (153):

$$q_r = h_r A_1 (T_1 - T_2) \quad \text{Ec. 146}$$

Donde:

$T_1$  y  $T_2$  = temperaturas cuerpos que intercambian calor por radiación, K.

El coeficiente radiativo ( $h_r$ ) correspondiente a planos paralelos infinitos podría calcularse igualando la ec. 144 y la ec. 147:

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} = h_r A_1 (T_1 - T_2)$$

Pero anteriormente se demostró la equivalencia entre ec. 144 y ec. 145:

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Por lo tanto, el coeficiente radiativo ( $h_r$ ) se obtiene igualando la ec. 145 con la ec. 147:

$$q_r = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = h_r A_1 (T_1 - T_2)$$

De donde se obtiene la ec. siguiente:

$$h_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \text{Ec. 147}$$

De donde una de las equivalencias de emisividad efectiva ( $\varepsilon_e$ ) se corresponde con la expresión:

$$\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \text{Ec. 148}$$

Sustituyendo la expresión anterior (ec. 149) en la ec. 148 se obtiene la ec. siguiente:

$$h_r = \varepsilon_e \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad \text{Ec. 149}$$

Éste  $h_r$  es usado a menudo en aplicaciones de la construcción en cálculos de transferencia de calor por radiación a través de cámaras, combinados con los estudios sobre convección natural en espacios cerrados. En el caso de la cavidad del bloque de concreto hueco la ecuación 147 y 150 toman la forma siguiente:

$$h_r = \varepsilon_e \sigma (T_c^2 + T_f^2) (T_c + T_f) \quad \text{Ec. 150}$$

$$q_r = h_r A_1 (T_c - T_f) \quad \text{Ec. 151}$$

### 7.3. Análisis numérico en la ingeniería

Los métodos numéricos son técnicas que permiten formular problemas matemáticos, de esta forma dichos problemas resolverse mediante simples operaciones matemáticas. En la actualidad existen diversos métodos numéricos, cuya característica común es la realización de tediosos cálculos matemáticos, pero el uso de computadoras ayuda a solucionar dicho inconveniente.

Los métodos numéricos son una poderosa herramientas que ayudan en la solución de problemas, manejan sistemas de ecuaciones de gran tamaño, manejan no linealidades y resuelven geometrías complicadas que con frecuencia se encuentran en ingeniería las cuales resultan imposibles de revolver por procedimientos analíticos.

En lo que se refiere a la conducción del calor durante los últimos 100 años se ha acumulado un gran número de soluciones analíticas para los problemas de transferencia de calor. Aun así, en numerosas situaciones prácticas, la geometría o condiciones de frontera son tales que no se ha podido obtener una solución analítica, o si se ha desarrollado una solución, ésta involucra una solución en serie tan compleja que la evaluación numérica se vuelve en extremo difícil. Para tales situaciones el enfoque más fructífero es el que se basa en técnicas de diferencia finita, cuyos principios básicos se presentan a continuación. (156)

#### 7.4. Conducción bidimensional en estado estacionario en diferencias finitas

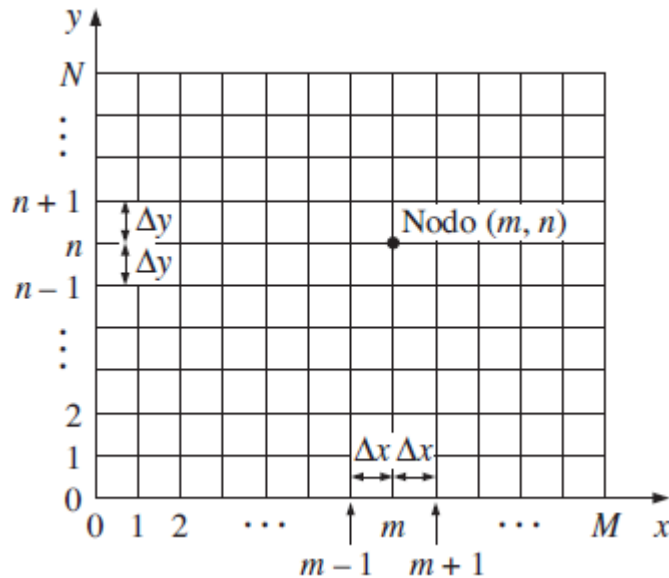
Sea un cuerpo bidimensional que se divide en incrementos iguales tanto en la dirección "x" como en la "y" cada punto nodal se identifica con dos subíndices:

- "m" corresponde a la abscisa.
- "n" corresponde a la ordenada.

Dicha división se muestra en la figura siguiente (130):

Figura 51. División nodal.

Fuente: Transferencia de calor y masa cuarta edición, Yunus A. Çengel.



Se necesita determinar la temperatura en cada punto nodal y se inicia por los ubicados en el interior del cuerpo.

Se utiliza como ecuación de gobierno la ya citada ecuación de Laplace:

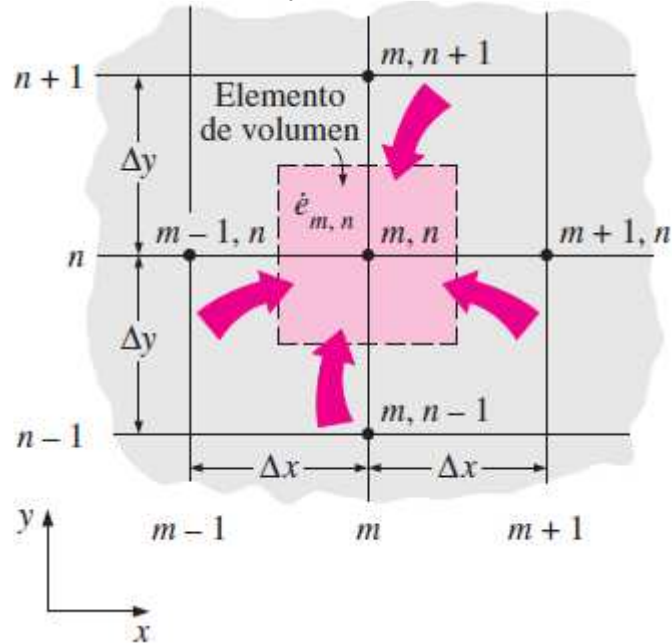
$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Ec. 135}$$

Esta ecuación puede aplicarse si se cumplen las condiciones siguientes:

- Régimen permanente.
- Conductividad térmica constante.
- Sólidos isotrópicos.
- No existen fuentes ni sumideros de calor.

Se toma la región rectangular en la cual es significativa la conducción de calor tanto en la dirección "x" como en la "y". Esta región se ha dividido en una malla rectangular de puntos nodales con incrementos Δx y Δy como puede observarse en la figura 52, considerando para este análisis una profundidad Δz = 1 como se muestra en la figura siguiente.

Figura 52. Elemento de volumen de un nodo interior general.  
 Fuente: Transferencia de calor y masa cuarta edición, Yunus A. Çengel.



Los gradientes de temperatura se pueden escribir de la siguiente manera (156):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+\frac{1}{2},n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad \text{Ec. 152}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-\frac{1}{2},n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad \text{Ec. 153}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n+\frac{1}{2}} \approx \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad \text{Ec. 154}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n-\frac{1}{2}} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y} \quad \text{Ec. 155}$$

Se calcula a continuación cada sumando de la ecuación de Laplace a partir de los gradientes obtenidos con las ecuaciones anteriores:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+\frac{1}{2},n} - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-\frac{1}{2},n}}{\Delta x} = \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad \text{Ec. 156}$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n+\frac{1}{2}} - \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n-\frac{1}{2}}}{\Delta y} = \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \quad \text{Ec. 157}$$

Sustituyendo en la ecuación de gobierno o de Laplace los valores obtenidos, se obtiene la aproximación en diferencias finitas:

$$\frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} = 0 \quad \text{Ec. 158}$$

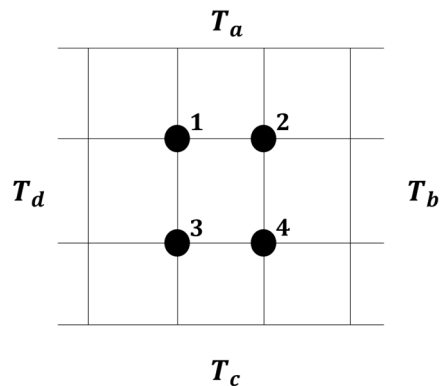
Que en el caso de  $\Delta x = \Delta y$  toma la forma:

$$T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} = 0 \quad \text{Ec. 159}$$

Como se ha considerado la conductividad térmica constante, todos los flujos pueden expresarse en términos de diferencias de temperaturas.

A modo de ejemplo, sea el caso de la figura siguiente:

Figura 53. Malla de ejemplo.  
Fuente: elaboración propia.



Donde:

$T_a, T_b, T_c$  y  $T_d$  = temperaturas superficiales conocidas.

$$T_b = T_c = T_d.$$

$$T_a > T_b.$$

$T_1, T_2, T_3$  y  $T_4$  = temperaturas nodales desconocidas.

Aplicando el método numérico se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$T_d + T_a + T_2 + T_3 - 4T_1 = 0 \quad \text{Ec. 160}$$

$$T_1 + T_a + T_b + T_4 - 4T_2 = 0 \quad \text{Ec. 161}$$

$$T_d + T_c + T_1 + T_4 - 4T_3 = 0 \quad \text{Ec. 162}$$

$$T_b + T_c + T_2 + T_3 - 4T_4 = 0 \quad \text{Ec. 163}$$

Del sistema anterior se determinan  $T_1, T_2, T_3$  y  $T_4$ , lo que permite calcular el flujo de calor mediante la siguiente expresión, teniendo en cuenta, como ya se ha dicho  $\Delta z = 1$  :

$$q = \sum k \Delta x \frac{\Delta T}{\Delta y} \quad \text{Ec. 164}$$

Donde  $\Delta T$  se toma en los contornos.

En este ejemplo el flujo de calor puede calcularse de dos formas:

- En la cara de temperatura  $T_a$ :

$$q = -k \frac{\Delta x}{\Delta y} [(T_1 - T_a) + (T_2 - T_a)] = -k(T_1 + T_2 - 2T_a) \quad \text{Ec. 165}$$

- En las otras tres caras:

$$q = -k \frac{\Delta x}{\Delta y} [(T_1 - T_d) + (T_3 - T_d) + (T_3 - T_c) + (T_2 - T_b) + (T_4 - T_c) + (T_4 - T_b)] \quad \text{Ec. 166}$$

## 7.5. Solución numérica del modelo de transferencia de calor en un bloque de concreto

La ecuación de gobierno o de Laplace para la transferencia de calor por conducción, se discretiza para obtener ecuaciones algebraicas lineales, utilizando el método de las diferencias finitas; además, se obtienen ecuaciones particulares dependiendo de las condiciones de frontera e interfase (153).

### 7.5.1. Caso de nodos internos

Para nodos internos se aplica la ecuación siguiente que se obtiene partiendo de la ec. 160 que fue desarrollada en la sección anterior:

$$\frac{(T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1})}{4} = T_{m,n} \quad \text{Ec. 167}$$

### 7.5.2. Caso de frontera adiabática

La figura siguiente muestra las fronteras adiabáticas de bloque de concreto hueco

Figura 54. Condiciones de frontera en un bloque de concreto con huecos.  
Fuente: elaboración propia.

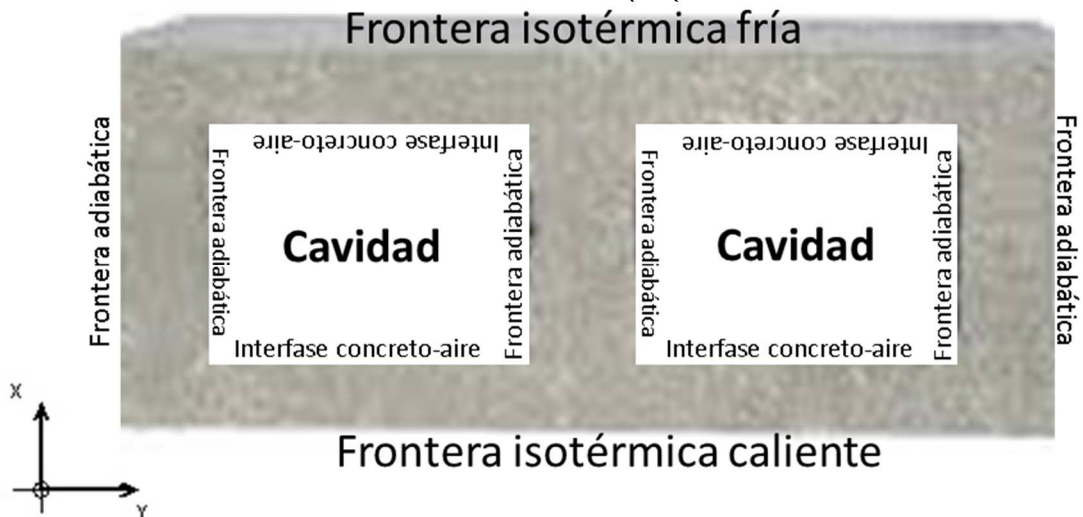
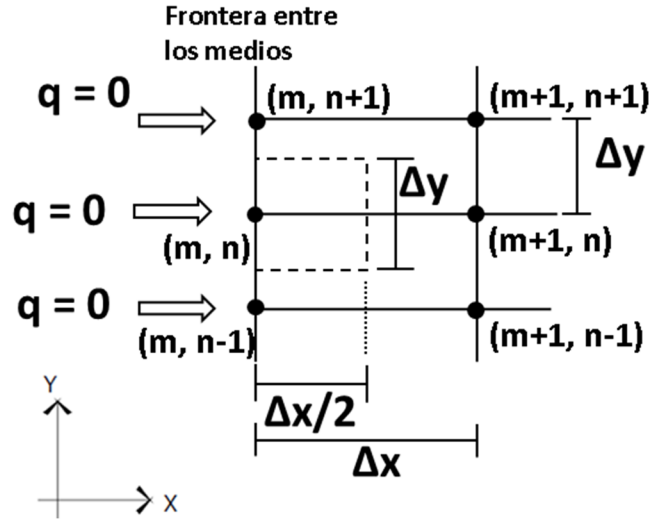


Figura 55. Nodo con frontera adiabática ( $q=0$ ).  
Fuente: elaboración propia.



A partir de la figura anterior se obtienen las ecuaciones que se muestran a continuación, necesarias para aplicar la ecuación de gobierno:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+\frac{1}{2},n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\frac{\Delta x}{2}} \quad \text{Ec. 168}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n+\frac{1}{2}} \approx \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad \text{Ec. 169}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n-\frac{1}{2}} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y} \quad \text{Ec. 170}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación de gobierno:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+\frac{1}{2},n}}{\Delta x} = \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\frac{(\Delta x)^2}{2}} = \frac{2T_{m+1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad \text{Ec. 171}$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n+\frac{1}{2}} - \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n-\frac{1}{2}}}{\Delta y} = \frac{(T_{m,n+1} - T_{m,n}) - (T_{m,n} - T_{m,n-1})}{(\Delta y)^2} \quad \text{Ec. 172}$$

Una vez conocidos estos sumandos se tiene:

$$\frac{2T_{m+1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{(T_{m,n+1} - T_{m,n}) - (T_{m,n} - T_{m,n-1})}{(\Delta y)^2} = 0 \quad \text{Ec. 173}$$

Como  $\Delta x = \Delta y$  toma la forma:

$$2T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1} - T_{m,n} - T_{m,n} + T_{m,n-1} = 0$$

$$2T_{m+1,n} - 4T_{m,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} = 0$$

$$2T_{m+1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} = 4T_{m,n}$$

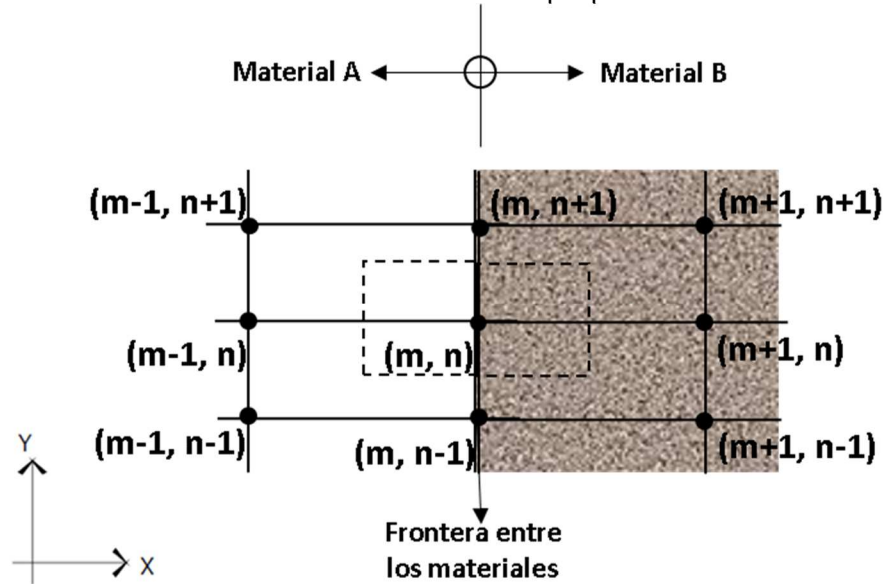
$$\frac{2T_{m+1,n}}{4} + \frac{T_{m,n+1}}{4} + \frac{T_{m,n-1}}{4} = T_{m,n}$$

$$0.5T_{m+1,n} + 0.25T_{m,n+1} + 0.25T_{m,n-1} = T_{m,n} \quad \text{Ec. 174}$$

### 7.5.3. Caso de interfase entre dos materiales sólidos

En la figura siguiente se esquematiza la interfase entre dos materiales y los nodos:

Figura 56. Nodo en la interfase entre dos materiales diferentes.  
Fuente: elaboración propia.



A tenor de que se tienen dos materiales sólidos de distintas conductividades térmicas se trabaja con la conductividad media para los nodos en la frontera entre materiales:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_a + \lambda_b}{2} \quad \text{Ec. 175}$$

La transferencia de calor en este caso se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{\lambda_a \Delta y \Delta z (T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \frac{\lambda_b \Delta y \Delta z (T_{m+1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \frac{\bar{\lambda} \Delta x \Delta z (T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} + \frac{\bar{\lambda} \Delta x \Delta z (T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

Como  $\Delta z = 1$  y  $\Delta x = \Delta y$  toma la forma:

$$\lambda_a (T_{m-1,n} - T_{m,n}) + \lambda_b (T_{m+1,n} - T_{m,n}) + \bar{\lambda} (T_{m,n+1} - T_{m,n}) + \bar{\lambda} (T_{m,n-1} - T_{m,n}) = 0$$

$$\lambda_a T_{m-1,n} - \lambda_a T_{m,n} + \lambda_b T_{m+1,n} - \lambda_b T_{m,n} + \bar{\lambda} T_{m,n+1} - \bar{\lambda} T_{m,n} + \bar{\lambda} T_{m,n-1} - \bar{\lambda} T_{m,n} = 0$$

$$\lambda_a T_{m-1,n} + \lambda_b T_{m+1,n} + \bar{\lambda} (T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) = \lambda_a T_{m,n} + \lambda_b T_{m,n} + \bar{\lambda} T_{m,n} + \bar{\lambda} T_{m,n}$$

$$\lambda_a T_{m-1,n} + \lambda_b T_{m+1,n} + \bar{\lambda} (T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) = T_{m,n} (\lambda_a + \lambda_b + 2\bar{\lambda})$$

$$\frac{\lambda_a T_{m-1,n} + \lambda_b T_{m+1,n} + \bar{\lambda} (T_{m,n+1} + T_{m,n-1})}{\lambda_a + \lambda_b + 2\bar{\lambda}} = T_{m,n} \quad \text{Ec. 176}$$

Si se sustituye  $\bar{\lambda}$ :

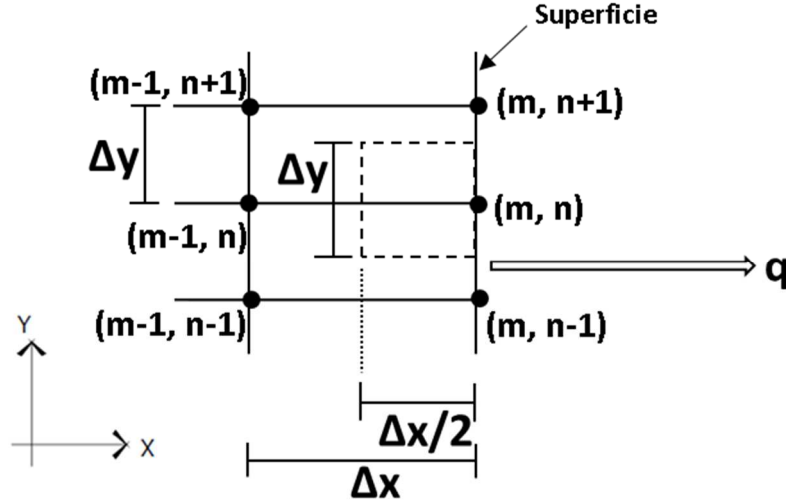
$$\frac{\lambda_a T_{m-1,n} + \lambda_b T_{m+1,n} + \bar{\lambda} (T_{m,n+1} + T_{m,n-1})}{2(\lambda_a + \lambda_b)} = T_{m,n} \quad \text{Ec. 177}$$



#### 7.5.4. Caso de interfase sólido-aire

En la figura siguiente se esquematiza el contorno convectivo. Cuando un sólido está sometido a condiciones de contorno convectivo como sucede en el hueco de los bloques de concreto, la temperatura de la superficie se debe calcular de forma distinta al método del apartado 7.5.2.

Figura 57. Ecuación nodal con condición de contorno convectiva.  
Fuente: elaboración propia.



De la figura anterior se obtiene la ecuación nodal correspondiente:

$$\frac{\lambda \Delta y \Delta z (T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \frac{\lambda \frac{\Delta x}{2} \Delta z (T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} + \frac{\lambda \frac{\Delta x}{2} \Delta z (T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = q_c \quad \text{Ec. 178}$$

El calor convectivo ( $q_c$ ) en este caso:

$$q_c = h_c \Delta y \Delta z (T_{m,n} - T_\infty) \quad \text{Ec. 179}$$

Sustituyendo la ec. anterior en la ecuación 179, recordando que  $\Delta z = 1$  y que  $\Delta x = \Delta y$  se tiene:

$$\lambda (T_{m-1,n} - T_{m,n}) + \frac{\lambda (T_{m,n+1} - T_{m,n})}{2} + \frac{\lambda (T_{m,n-1} - T_{m,n})}{2} = h_c \Delta x (T_{m,n} - T_\infty) \quad \text{Ec. 180}$$

$$\lambda T_{m-1,n} - \lambda T_{m,n} + \frac{\lambda T_{m,n+1} - \lambda T_{m,n}}{2} + \frac{\lambda T_{m,n-1} - \lambda T_{m,n}}{2} = h_c \Delta x T_{m,n} - h_c \Delta x T_\infty$$

$$\lambda T_{m-1,n} - \lambda T_{m,n} + \frac{\lambda T_{m,n+1}}{2} - \frac{\lambda T_{m,n}}{2} + \frac{\lambda T_{m,n-1}}{2} - \frac{\lambda T_{m,n}}{2} - h_c \Delta x T_{m,n} + h_c \Delta x T_\infty = 0$$

$$\lambda T_{m-1,n} - 2\lambda T_{m,n} + \frac{\lambda T_{m,n+1}}{2} + \frac{\lambda T_{m,n-1}}{2} - h_c \Delta x T_{m,n} + h_c \Delta x T_\infty = 0$$

Dividiendo ambos miembros de la igualdad por  $\lambda$ :

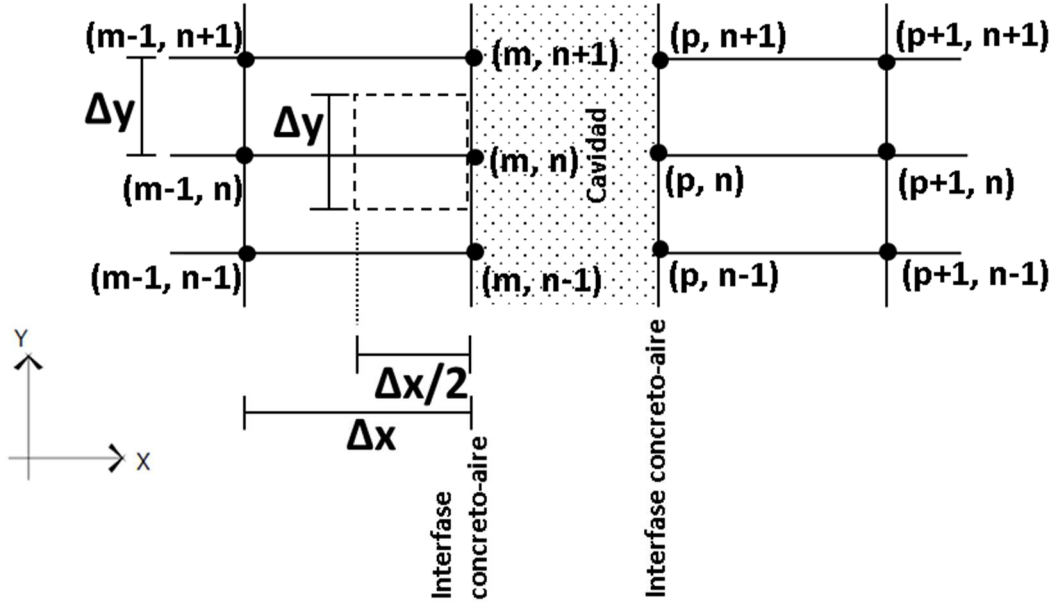
$$T_{m-1,n} - T_{m,n} \left( 2 + \frac{h_c \Delta x}{\lambda} \right) + \frac{T_{m,n+1}}{2} + \frac{T_{m,n-1}}{2} + \frac{h_c \Delta x T_\infty}{\lambda} = 0$$

$$\frac{1}{2} (2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) - T_{m,n} \left( 2 + \frac{h_c \Delta x}{\lambda} \right) + \frac{h_c \Delta x T_\infty}{\lambda} = 0 \quad \text{Ec. 181}$$

Como se expuso anteriormente, las transferencias de calor por radiación y convección están con frecuencia estrechamente asociadas, por lo que se debe tener en cuenta el calor total transferido por ambos mecanismos. En el caso del hueco del bloque de concreto debe modificarse la ec. anterior ya que también hay transferencia de calor por radiación como muestra la figura siguiente.

Figura 58. Interfase concreto-aire.

Fuente: elaboración propia.



La ec. 179 se transforma en la ec. siguiente:

$$\frac{\lambda \Delta y \Delta z (T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \frac{\lambda \frac{\Delta x}{2} \Delta z (T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} + \frac{\lambda \frac{\Delta x}{2} \Delta z (T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = q_c + q_r \quad \text{Ec. 182}$$

El calor radiativo ( $q_r$ ) en este caso:

$$q_r = h_r \Delta y \Delta z (T_{m,n} - T_{p,n}) \quad \text{Ec. 183}$$

Sustituyendo  $q_r$  en la ecuación 183, recordando que  $\Delta z = 1$  y que  $\Delta x = \Delta y$ , se tiene:

$$\lambda (T_{m-1,n} - T_{m,n}) + \frac{\lambda (T_{m,n+1} - T_{m,n})}{2} + \frac{\lambda (T_{m,n-1} - T_{m,n})}{2} = h_c \Delta x (T_{m,n} - T_{p,n}) + h_r \Delta x (T_{m,n} - T_{p,n}) \quad \text{Ec. 184}$$

$$\lambda T_{m-1,n} - \lambda T_{m,n} + \frac{\lambda T_{m,n+1} - \lambda T_{m,n}}{2} + \frac{\lambda T_{m,n-1} - \lambda T_{m,n}}{2} = h_c \Delta x T_{m,n} - h_c \Delta x T_{p,n} + h_r \Delta x T_{m,n} - h_r \Delta x T_{p,n}$$

$$\lambda T_{m-1,n} - \lambda T_{m,n} + \frac{\lambda T_{m,n+1}}{2} - \frac{\lambda T_{m,n}}{2} + \frac{\lambda T_{m,n-1}}{2} - \frac{\lambda T_{m,n}}{2} - h_c \Delta x T_{m,n} + h_c \Delta x T_{p,n} - h_r \Delta x T_{m,n} + h_r \Delta x T_{p,n} = 0$$

$$\lambda T_{m-1,n} - 2\lambda T_{m,n} + \frac{\lambda T_{m,n+1}}{2} + \frac{\lambda T_{m,n-1}}{2} - \Delta x T_{m,n} (h_c + h_r) + \Delta x T_{p,n} (h_c + h_r) = 0$$

Dividiendo ambos miembros de la igualdad por  $\lambda$

$$T_{m-1,n} - T_{m,n} \left( 2 + \frac{(h_c + h_r) \Delta x}{\lambda} \right) + \frac{T_{m,n+1}}{2} + \frac{T_{m,n-1}}{2} + \frac{(h_c + h_r) \Delta x T_{p,n}}{\lambda} = 0$$

$$\frac{1}{2} (2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) - T_{m,n} \left( 2 + \frac{(h_c + h_r) \Delta x}{\lambda} \right) + \frac{(h_c + h_r) \Delta x T_{p,n}}{\lambda} = 0 \quad \text{Ec. 185}$$

A tenor de que la interfase concreto-aire de la figura 59 es una superficie isoterma:

$$T_{m,n} = T_{m,n+1} = T_{m,n-1}$$

Lo que implica que no hay transferencia de calor entre nodos situados en dicha superficie y la ecuación nodal toma la forma:

$$\frac{\lambda \Delta y \Delta z (T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} = h_c \Delta y \Delta z (T_{m,n} - T_{p,n}) + h_r \Delta y \Delta z (T_{m,n} - T_{p,n}) \quad \text{Ec. 186}$$

Como  $\Delta z = 1$  y  $\Delta x = \Delta y$ , se tiene:

$$\lambda (T_{m-1,n} - T_{m,n}) = h_c \Delta x (T_{m,n} - T_{p,n}) + h_r \Delta x (T_{m,n} - T_{p,n})$$

Dividiendo ambos miembros de la igualdad por  $\lambda$ :

$$\begin{aligned} (T_{m-1,n} - T_{m,n}) &= \frac{h_c \Delta x (T_{m,n} - T_{p,n})}{\lambda} + \frac{h_r \Delta x (T_{m,n} - T_{p,n})}{\lambda} \\ T_{m-1,n} - T_{m,n} &= \frac{h_c \Delta x T_{m,n} - h_c \Delta x T_{p,n}}{\lambda} + \frac{h_r \Delta x T_{m,n} - h_r \Delta x T_{p,n}}{\lambda} \\ T_{m-1,n} - T_{m,n} &= \frac{h_c \Delta x T_{m,n}}{\lambda} - \frac{h_c \Delta x T_{p,n}}{\lambda} + \frac{h_r \Delta x T_{m,n}}{\lambda} - \frac{h_r \Delta x T_{p,n}}{\lambda} \\ T_{m-1,n} - T_{m,n} &= (h_c + h_r) \frac{\Delta x T_{m,n}}{\lambda} - (h_c + h_r) \frac{\Delta x T_{p,n}}{\lambda} \\ T_{m-1,n} &= (h_c + h_r) \frac{\Delta x T_{m,n}}{\lambda} - (h_c + h_r) \frac{\Delta x T_{p,n}}{\lambda} + T_{m,n} \\ T_{m-1,n} &= T_{m,n} \left[ (h_c + h_r) \frac{\Delta x}{\lambda} + 1 \right] - (h_c + h_r) \frac{\Delta x T_{p,n}}{\lambda} \end{aligned}$$

Haciendo  $R = \frac{\Delta x}{\lambda}$ :

$$\begin{aligned} T_{m-1,n} &= T_{m,n} [(h_c + h_r)R + 1] - (h_c + h_r)RT_{p,n} \\ T_{m,n} &= \frac{T_{m-1,n} + (h_c + h_r)RT_{p,n}}{(h_c + h_r)R + 1} \quad \text{Ec. 187} \end{aligned}$$

## 7.6. Técnica de solución

Se ha visto que el método numérico es un medio de aproximar una distribución continua de temperatura mediante elementos finitos. La aproximación será tanto mejor en la medida en que el número de nodos que se tomen sea mayor; ahora bien, a mayor número de nodos más ecuaciones y soluciones más engorrosas por lo que se necesita el auxilio de ordenadores.

Un grupo de investigación de la Universidad de Sonora, México, realizaron un estudio (146) basado en lo desarrollado en este capítulo, del cual se comparten sus resultados en las secciones siguientes. Dichos resultados se comparten aquí porque responde a la pregunta de qué pasaría si se rellenan los huecos de los bloques con aislamiento y los compara con aislamiento colocado en la superficie exterior del muro.

Los cálculos se efectuaron mediante hoja electrónica, tomando un espaciamiento de malla uniforme y constante de 1 mm. El balance de energía correspondiente

a cada nodo se resolvió en forma iterativa. El intervalo de temperaturas a la superficie exterior del muro fue [30 °C-70 °C], que se corresponde con las temperaturas observadas en un día típico de verano en la ciudad de Hermosillo, México. En lo que se refiere a la superficie fría del muro se consideró como isoterma a 25 °C constantes, que es lo que corresponde en el caso de un espacio climatizado. Las propiedades del concreto se tomaron de los valores proporcionados por Çengel (2003) ( $\lambda_{concreto} = 1,10 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  y  $\varepsilon_{concreto} = 0,93$ ). (146)

### 7.7. Validación bibliográfica del modelo matemático y el algoritmo numérico

Ossama (149) y Borbon A. (152) obtuvieron datos experimentales que se tomaron para comparar los resultados obtenidos por (146) sin considerar el efecto de la unión entre bloques con mortero. La tabla siguiente recoge el valor de la resistencia térmica del muro obtenido y lo compara con los resultados de Ossama y Borbón. De tal comparación se infiere un error relativo del 4,83 % para el muro con bloque de 15 cm y del 6,32 % para el muro con bloque de 12 cm, en consecuencia el modelo matemático y el algoritmo numérico utilizado se consideraron validados.

Tabla 42. Valores de resistencia térmica experimentales comparado con los resultados del modelo.

Fuente: Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico.

Descripción del muro	Temp. superficie caliente ( $T_{scr}$ , °C)	Temp. superficie fría ( $T_{sf}$ , °C)	Diferencia de temp. $\Delta T$ , °C	Resistencia térmica del muro ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ )			Error relativo (%)
				Ossama	Borbón	Univ. Sonora	
Con bloque de 15 cm	54,9	29	25,9	0,331	----	0,347	4,83
Con bloque de 12 cm	42,34	28,76	13,58	----	0,174	0,163	6,32

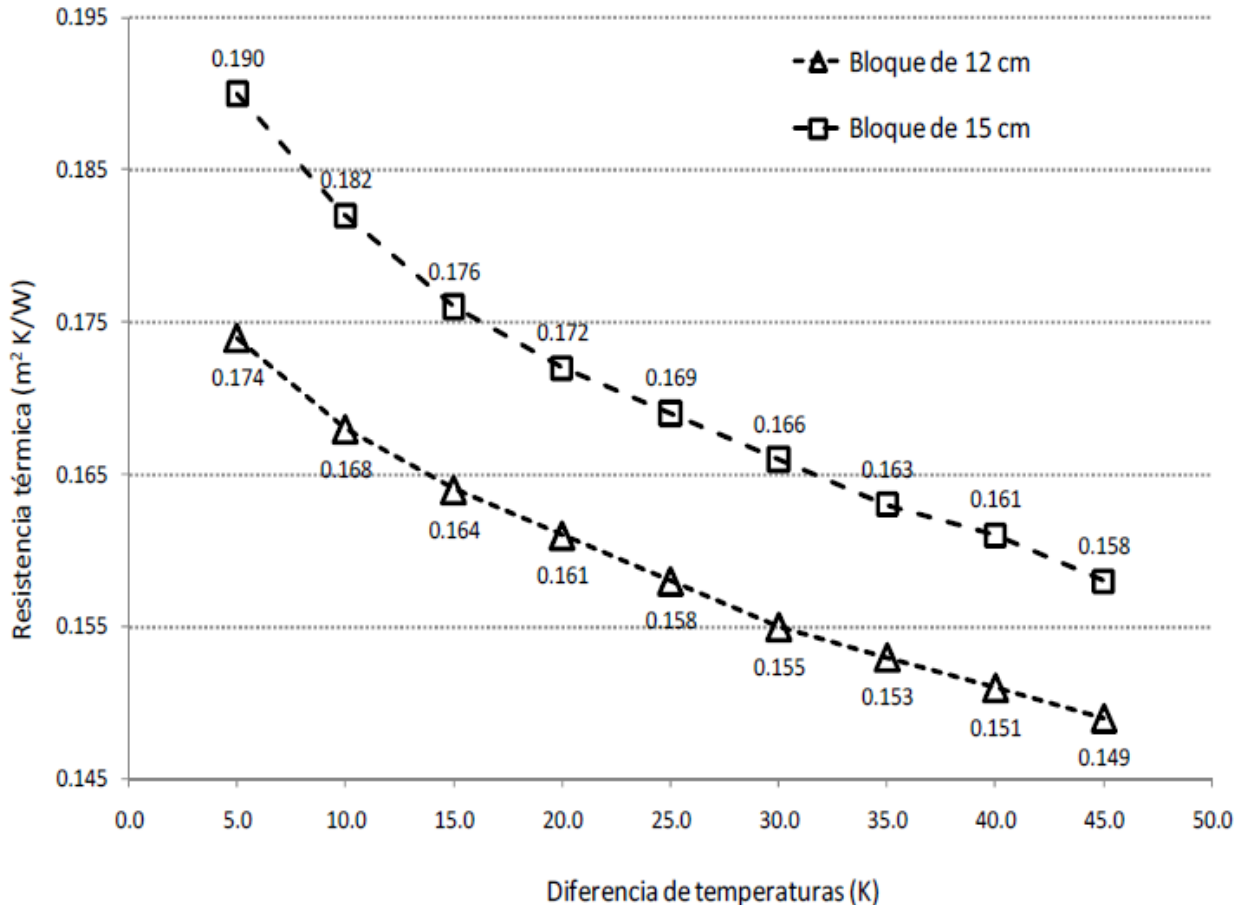
### 7.8. Resistencia térmica del muro de bloque de concreto y gradiente térmico

Realizada la validación anterior se tomaron 9 diferencias de temperaturas entre la superficie exterior e interior partiendo de 5 K incrementando en 5 K hasta 45 K. Observándose que la resistencia térmica variaba con esta diferencia de temperaturas tanto para bloques de 12 cm y 15 cm dicha variación se recoge en la figura siguiente se puede apreciar que la resistencia térmica para el muro construido con bloques de 15 cm oscila entre 0,190  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  para  $\Delta T = 5 \text{ K}$  y 0,158  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  para  $\Delta T = 45 \text{ K}$ , resultando un valor promedio 0,171  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . En lo que se refiere al bloque de 12 cm los valores de la resistencia térmica fueron ligeramente inferiores, entre 8,4 % y 5,7 % respectivamente. La mayor resistencia térmica de 0,174  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  se obtuvo para un  $\Delta T = 5 \text{ K}$  y la menor de 0,149  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  para  $\Delta T = 45 \text{ K}$  resultando un valor promedio de 0,159  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . La disminución de la resistencia térmica del muro de bloque de concreto con el aumento del gradiente térmico es causada por la variación de las propiedades termodinámicas del aire contenido en el interior de la cavidad alargada que

forman los bloques. Este decremento de la resistencia es un importante inconveniente, debido a que se hace presente en las condiciones más desfavorables para el confort térmico en el interior de las viviendas (146).

Figura 59. Variación de la resistencia térmica con el gradiente térmico.

Fuente: Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico.



Mediante la técnica de regresión por mínimos cuadrados se obtuvo la variación de la resistencia térmica del muro de bloques de concreto con la diferencia de temperaturas entre la pared exterior e interior de dicho muro, obteniéndose (146):

$$R_{12\text{ cm}} = 0,1858 - 0,0055 \Delta T^{\frac{1}{2}} \quad (r^2 = 0,998) \quad \text{Ec. 188}$$

$$R_{15\text{ cm}} = 0,2041 - 0,0069 \Delta T^{\frac{1}{2}} \quad (r^2 = 0,993) \quad \text{Ec. 189}$$

### 7.9. Comportamiento térmico del muro de bloques con aislamiento térmico de poliestireno

Como consecuencia de que la resistencia térmica del muro de bloque es muy baja se analizó el comportamiento de dicho muro aislándolo térmicamente. El primer tipo de estudio se realizó considerando la superficie exterior del muro recubierto de poliestireno exclusivamente y el segundo considerando las cavidades rellenas de dicho aislante. Las figuras siguientes reflejan la evolución de las resistencias térmicas para bloques de 12 cm y 15 cm respectivamente. A fin de no dificultar la comparación se consideró el mismo volumen de aislamiento térmico en los dos estudios o casos considerados (146).

Figura 60. Resistencia térmica con aislante térmico exterior y en huecos, bloques de 12 cm.

Fuente: Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico.

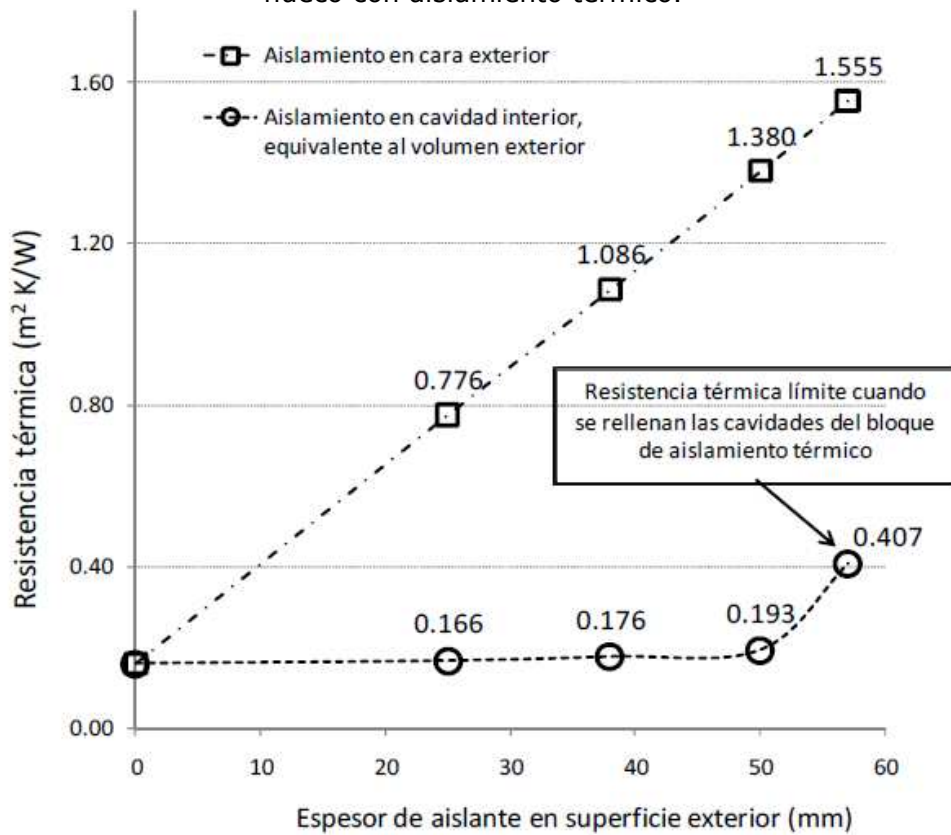
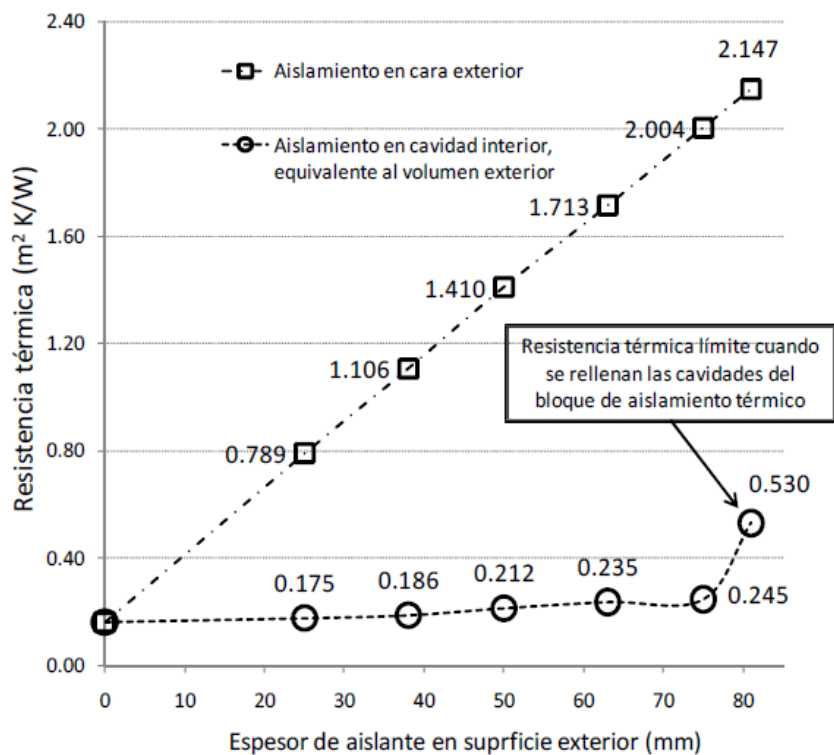


Figura 61. Resistencia térmica con aislante térmico exterior y en huecos, bloques de 15 cm.

Fuente: Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico.



Puede apreciarse una diferencia significativa en los valores que toma la resistencia térmica que es consecuencia de la posición del aislamiento térmico. En la figura 61 se puede observar que al aplicar 25 mm de poliestireno a la superficie exterior la resistencia térmica del muro es 0,766 m<sup>2</sup>·K/W. Ahora bien, al colocar el mismo volumen de poliestireno en la cavidad la resistencia térmica es 0,166 m<sup>2</sup>·K/W. En consecuencia resulta con una diferencia porcentual de 361 %. (146)

Para ambos bloques, cuando el poliestireno se coloca en la superficie exterior se produce un incremento significativo de la resistencia térmica, mientras que cuando se rellenan las cavidades con dicho aislamiento la resistencia térmica no aumenta apreciablemente excepto cuando utilizamos un volumen de poliestireno equivalente a un espesor de 58 mm en la superficie exterior. Este comportamiento es consecuencia de que al aislar la superficie exterior se evita que dicha superficie del bloque se sobrecaliente lo que tiene como efecto un decremento sustancial de la transferencia de calor por conducción a través del concreto. También se produce un decremento en la transferencia de calor por convección y radiación en la cavidad. Sin embargo, al rellenar la cavidad con aislamiento térmico quedan suprimidas las transferencias de calor por radiación y convección, pero no la conducción a través del concreto. Mediante la técnica de regresión por mínimos cuadrados se obtuvieron las correlaciones para la variación de la resistencia térmica del muro de bloques de concreto con el espesor de aislamiento ( $e_a$ ) (146):

$$R_{12\text{ cm}} = 0,1604 - 0,0244e_a \quad (r^2 = 0,999) \quad \text{Ec. 190}$$

$$R_{15\text{ cm}} = 0,1716 - 0,0245e_a \quad (r^2 = 0,999) \quad \text{Ec. 191}$$

También para el muro de bloque de concreto con aislamiento térmico en las cavidades se obtuvo, de la misma manera, la variación de la resistencia térmica de dicho muro con aislamiento térmico en la cavidad (146).

$$R_{12\text{ cm}} = \frac{0,1595 - 0,0026e_a}{1 - 0,0170e_a} \quad (r^2 = 0,998) \quad \text{Ec. 192}$$

$$R_{15\text{ cm}} = \frac{0,1596 - 0,0019e_a}{1 - 0,0162e_a} \quad (r^2 = 0,990) \quad \text{Ec. 193}$$

## 8. Ensayos de campo: metodología y resultados

### 8.1. Vivienda ensayada

Como se indicó en el capítulo 3, la mayoría de las viviendas dominicanas son unifamiliares aisladas o pareadas. Consta de uno o dos plantas y de un patio alrededor protegido por muro. Su envoltente se construye con bloques de hormigón enlucidos con mortero tanto la cara exterior como interior. Su cubierta es de hormigón (ver sección 3.3).

Para los ensayos de esta tesis, se eligió una vivienda cuya tipología constructiva es la dominante, desocupada y cuya fachada principal esta orienta a 315° (noroeste, NO). Dicha vivienda se ubica en el municipio Los Alcarrizos perteneciente a la provincia Santo Domingo.

Figura 62. Plano de la vivienda ensayada.





A continuación, se presentan otros datos de interés de la vivienda:

1. Pareada con otra vivienda en uno de sus lados, con una galería en la fachada principal, marquesina lateral, patio alrededor con un muro de bloques de hormigón que le circunda.
2. Paramentos construidos con bloques de hormigón vibrado parcialmente llenos, enlucidos con morteros en cara exterior e interior. La tabla siguiente muestra las características de dichos bloques.

Tabla 43. Características de los bloques de hormigón

Propiedad	Mortero	Bloques de hormigón
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1800	1170
Calor específico [J/(kg·K)]	1000	840
Conductividad térmica [W/(m·K)]	1	0,55
Espesor (m)	0,015	0,15

3. Hormigón armado en la cubierta enlucido con mortero tanto exterior como interiormente. La tabla siguiente recoge las características de la cubierta.

Tabla 44. Características constructivas de cubierta.

Propiedad	Mortero	Hormigón armado
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1800	2400
Calor específico [J/(kg·K)]	1000	1000
Conductividad térmica [W/(m·K)]	1	2,3
Espesor (m)	0,02	0,12

4. Ventanas tipo corredera de una sola hoja de vidrio sencillo gris de 3 mm con marco de aluminio sin rotura de puente térmico.
5. Puertas, panel tipo sándwich color blanco, de zincalum (aleación aluminio-zinc) y poliuretano inyectado como núcleo. Véanse características en la tabla siguiente.

Tabla 45. Características de las puertas.

Propiedad	Aluminio	Poliuretano
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2800	30
Calor específico [J/(kg·K)]	880	1470
Conductividad térmica [W/(m·K)]	160	0,0280
Espesor (m)	0,0006	0,0428

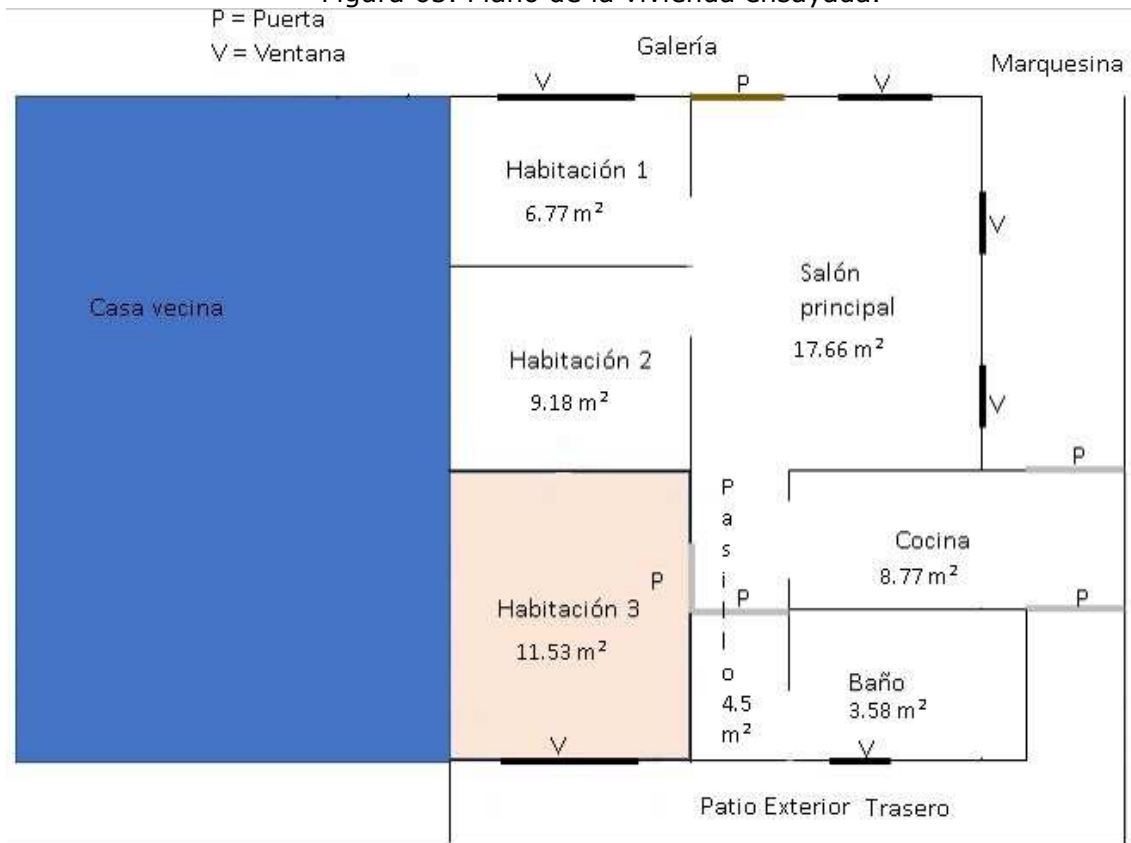
6. Piso de hormigón más capa de mortero con cerámica, cuyas propiedades pueden verse en la tabla siguiente.

Tabla 46. Características constructivas del piso o suelo.

Propiedad	Hormigón armado	Mortero	Plaqueta o baldosa cerámica
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2400	1800	2000
Calor específico [J/(kg·K)]	1000	1000	800
Conductividad térmica [W/(m·K)]	2,3	1	1
Espesor (m)	0,1	0,015	0,006

La vivienda seleccionada consta de tres habitaciones, 1 salón principal, 1 cocina, 1 baño, 1 galería y una marquesina. La figura siguiente muestra el plano de dicha vivienda con sus áreas respectivas.

Figura 63. Plano de la vivienda ensayada.



En la figura siguiente se observa el dormitorio en el que se realizaron los ensayos, consistentes en aislar térmicamente el paramento exterior con las placas de aislamiento elegidas colocándolas en diferentes posiciones. Durante los ensayos se mantuvieron cerradas la puerta y la ventana de la habitación seleccionada, dejando las otras puertas y ventanas de la vivienda abiertas como es práctica habitual en la R. D. (ver capítulo 3).

Figura 64. Dormitorio elegido.



## 8.2. Placas aislantes utilizadas

Partiendo de la hoja técnica que provee el fabricante las placas aislantes se fabrican con los siguientes componentes: cemento Portland, carbonato de calcio, fibras celulósicas obtenidas a partir de papel reciclado y otros agregados menores.

Son Tipo A Grado I de acuerdo con la norma ASTM 1186-08 (2012) y están certificadas como categoría A Clase 2 y Categoría B clase 2 de acuerdo con la norma INTE/ISO 8336:2011. Son diseñadas para revestimiento de interiores y exteriores con acabado monolítico. Son resistentes a la intemperie, los ataques de insectos, ataques de hongos, humedad, fuego, calor y humedad. Se pueden instalar sobre estructura metálica o de madera. Se pueden usar en paredes de alto tráfico, son resistentes al impacto, pueden ser cortadas, lijadas, clavadas, perforadas y atornilladas con herramientas convencionales. Aceptan cualquier tipo de acabado.

La tabla siguiente presenta las especificaciones técnicas descritas en la ficha técnica facilitada por el fabricante.

Tabla 47. Especificaciones técnicas.  
Fuente: ficha técnica del producto facilitada por el fabricante.

Descripción	Valor mín.	Valor máx.
<b>Resistencia a la Flexión (en equilibrio) (N/mm<sup>2</sup>) (ISO 8336/ASTM C 1186)</b>	7,0	
<b>Módulo Elástico de Flexión (en equilibrio) (kN/mm<sup>2</sup>) (ISO 8336/ASTM C 1186)</b>	2,5	4,0
<b>Densidad (kg/dm<sup>3</sup>) (ISO 8336)</b>	1,10	1,20
<b>Humedad (%)</b>	0,0	8,0
<b>Absorción Total (%) (ISO 8336)</b>		40
<b>Absorción Superficial Cobb (%)</b>		25
<b>Movimiento de Humedad (%) (ISO 8336/ASTM C 1186)</b>		0,13
<b>Contracción Total (mm/m)</b>		3,0
<b>Absorción de Agua (Karsten)(ml/24 h) Cara expuesta</b>		3,0
<b>Desarrollo de humo (ASTM E – 84)</b>		0
<b>Propagación de llama (ASTM E – 84)</b>		0

Tabla 48. Dimensiones nominales.  
Fuente: ficha técnica del producto facilitada por el fabricante.

Dimensión	Medida (mm)			Tolerancia (mm)
<b>Espesor</b>	10,0			±0,6
<b>Ancho útil</b>	1219			±2,0
<b>Largo</b>	2438	3048	3657	±2,0
<b>Diagonal</b>	2726	3283	3855	±2,0

Tabla 49. Dimensiones nominales.  
Fuente: ficha técnica del producto facilitada por el fabricante.

Características	Largo de lámina		
	2438 mm	3048 mm	3657 mm
<b>Peso (kg/un)</b>	35,89	44,86	53,84
<b>Cubrimiento útil (m<sup>2</sup>)</b>	2,97	3,72	4,46

El fabricante no facilitó datos de propiedades térmicas de las placas, por esta razón, con el laboratorio de materiales de la Universidad del País Vasco UPV/EHU se determinó el calor específico y con el laboratorio de edificaciones de la UPV/EHU se determinó la conductividad térmica, dichos valores se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 50. Características térmicas de las placas.

Propiedad	Placa
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1150
<b>Calor específico [J/(kg·K)]</b>	1041,15
<b>Conductividad térmica [W/(m·K)]</b>	0,32
<b>Espesor (m)</b>	0,01

### 8.3. Meteorología en los días de ensayo

Los datos climáticos para los días ensayados se corresponden con los datos normales, en consecuencia, los días de los ensayos se consideran como un día normal.

Tomando como referencia los datos normales facilitados por la Oficina Nacional de Meteorología Dominicana (ONAMET) se establece que para un día normal en el mes de octubre se tienen los datos climáticos tomados de la estación más cercana (<5 km) al sector de ubicación de la vivienda ensayada. En la tabla siguiente se presentan los datos normales más los datos promedios medidos de cada día de ensayo:

Tabla 51. Datos climáticos normales y promedios.

ESTACIÓN	OCT	11 oct.	19 oct.	23 oct.	28 oct.
<b>A. HERRERA</b> (Lat. 18,45 - long. -69,98)	<b>Valores normales</b>	<b>Valores promedios del día</b>			
<b>TEMPERATURA MEDIA (°C)</b>	27.0	27.0	27.1	27.7	27.8
<b>TEMPERATURA MÁXIMA (°C)</b>	31.3	31.3	31.4	32.7	32.2
<b>TEMPERATURA MÍNIMA (°C)</b>	22.7	22.9	24.4	24.2	24.4
<b>HUMEDAD RELATIVA (%)</b>	78.8	81.3	79.2	76.0	77.2
<b>VELOCIDAD DE VIENTO (km/h)</b>	11.0	6.4	10.7	8.7	7.1
<b>PRESIÓN DE ESTACIÓN (mbar)</b>	1005.5	1012.2	1014.0	1013.0	1013.9

### 8.4. Instrumento de medida utilizado

Instrumento utilizado: medidor de temperatura PCE-666 de PCE Instruments: medidor de temperatura combinado para medir con y sin contacto/medición a través de pinza, sonda e infrarrojo. Homologado y calibrado.

Tabla 52. Especificaciones técnicas del medidor de temperatura superficial.

Fuente: Datos proporcionados por el fabricante.

<b>Especificaciones técnicas</b>	
<b>Rango de temperatura: Infrarrojo</b>	-35 ... +260 °C
<b>Tiempo de respuesta</b>	<500 ms
<b>Precisión Infrarrojo</b>	±2 % del valor o ±2 °C
<b>Óptica</b>	1:1
<b>Grados de emisividad</b>	Ajustable (0,1 ... 1,0)
<b>Rango de temperatura: Sonda</b>	-40 ... +260 °C
<b>Rango de temperatura: Pinza</b>	-40 ... +230 °C
<b>Apertura de la pinza</b>	25 mm
<b>Precisión</b>	±1,5 % o ±2 °C
<b>Resolución</b>	0,1 °C
<b>Peso</b>	103 g
<b>Dimensiones</b>	183 x 52 x 25 mm

Figura 65. Instrumento para medir temperatura superficial.



## 8.5. Ensayos realizados

### 8.5.1. Sin aislamiento térmico

El 11 de octubre 2018 se registraron las medidas de la temperatura en la cara exterior y en la interior del paramento del habitáculo así como la interior en intervalos de una hora durante 24 horas. Denominado ensayo de campo 1 (E1).

### 8.5.2. Cara interior del paramento aislada térmicamente

El 19 de octubre 2018 tras haber aislado por su cara interior el paramento exterior de la habitación se registraron las temperaturas de las caras interior y exterior a intervalos de una hora durante 24 horas. Denominado ensayo de campo 2 (E2).

### 8.5.3. Cara exterior del paramento aislada térmicamente

El 23 de octubre 2018 tras haber aislado térmicamente el paramento por su cara exterior se registraron las temperaturas en ambas caras del citado muro a intervalos de una hora durante 24 horas. Denominado ensayo de campo 3 (E3).

### 8.5.4. Cara exterior e interior del paramento aisladas térmicamente

El 28 de octubre 2018 tras haber colocado placas aislantes tanto en la cara interior y exterior del paramento, se registraron las temperaturas en ambas caras a intervalos de una hora durante 24 horas. Denominado ensayo de campo 4 (E4).

## 8.6. Resultados de los ensayos realizados *in situ*

A continuación, se presentan los resultados de las temperaturas superficiales medidas para los diferentes ensayos realizados.

### 8.6.1. Caso de paramento sin aislar térmicamente (ensayo E1)

La tabla siguiente muestra la evolución de la temperatura superficial tanto en su cara exterior como interior en la pared sin placas aislantes (ensayo de campo 1, E1).

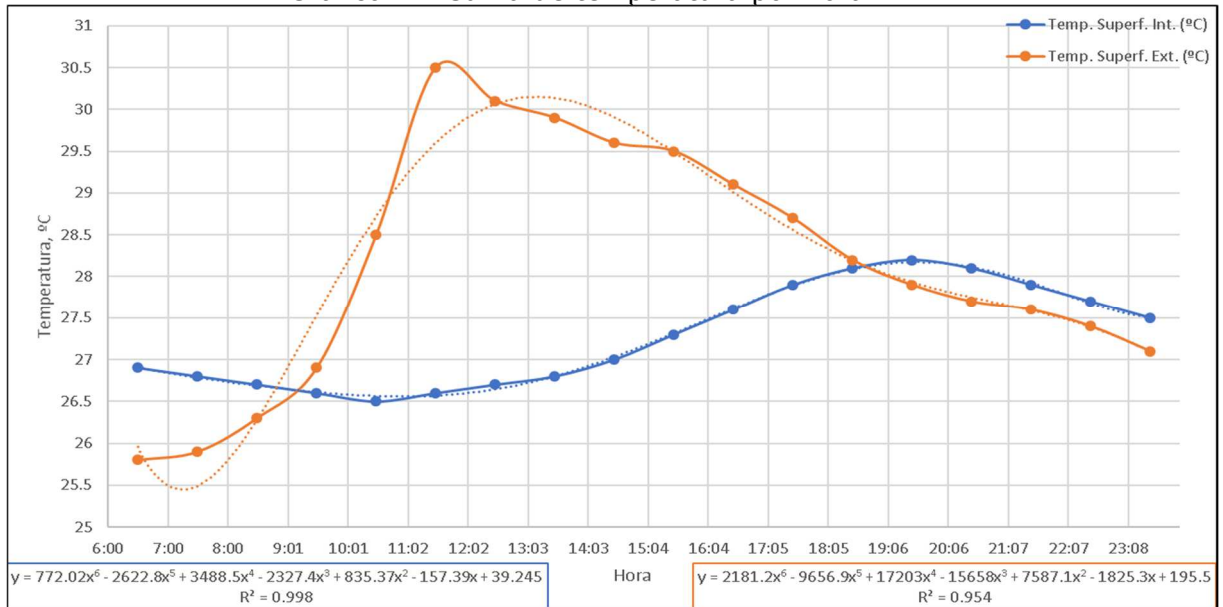
Tabla 53. Valores temperatura por hora E1.

<b>Hora</b>	<b>Temp. Superf. Int. (°C)</b>	<b>Temp. Superf. Ext. (°C)</b>
<b>6:30</b>	26,9	25,8
<b>7:30</b>	26,8	25,9
<b>8:30</b>	26,7	26,3
<b>9:30</b>	26,6	26,9
<b>10:30</b>	26,5	28,5
<b>11:30</b>	26,6	30,5
<b>12:30</b>	26,7	30,1
<b>13:30</b>	26,8	29,9
<b>14:30</b>	27	29,6
<b>15:30</b>	27,3	29,5
<b>16:30</b>	27,6	29,1
<b>17:30</b>	27,9	28,7
<b>18:30</b>	28,1	28,2
<b>19:30</b>	28,2	27,9
<b>20:30</b>	28,1	27,7
<b>21:30</b>	27,9	27,6
<b>22:30</b>	27,7	27,4
<b>23:30</b>	27,5	27,1
<b>Valores promedios</b>	27,27	28,15

En lo que se refiere a la onda térmica se amortigua un 64 % al atravesar el cerramiento, con un desfase de ocho horas entre la temperatura máxima exterior (30,5 °C) registrada a las 11:30 y la máxima interior (28,2 °C) registrada a las 19:30. El coeficiente de estabilidad térmica (c.e.t.) resultante es 0,36 correspondiente a un local con inercia térmica.

En el gráfico siguiente se puede ver la curva que siguen las temperaturas con sus respectivas líneas de tendencia.

Gráfico 11. Curva de temperatura por hora E1.





### 8.6.2. Caso de paramento aislado térmicamente por su cara interior (ensayo E2)

La tabla siguiente recoge la evolución de la temperatura superficial tanto exterior como interior en paramento aislado térmicamente por su cara interior (ensayo de campo 2, E2).

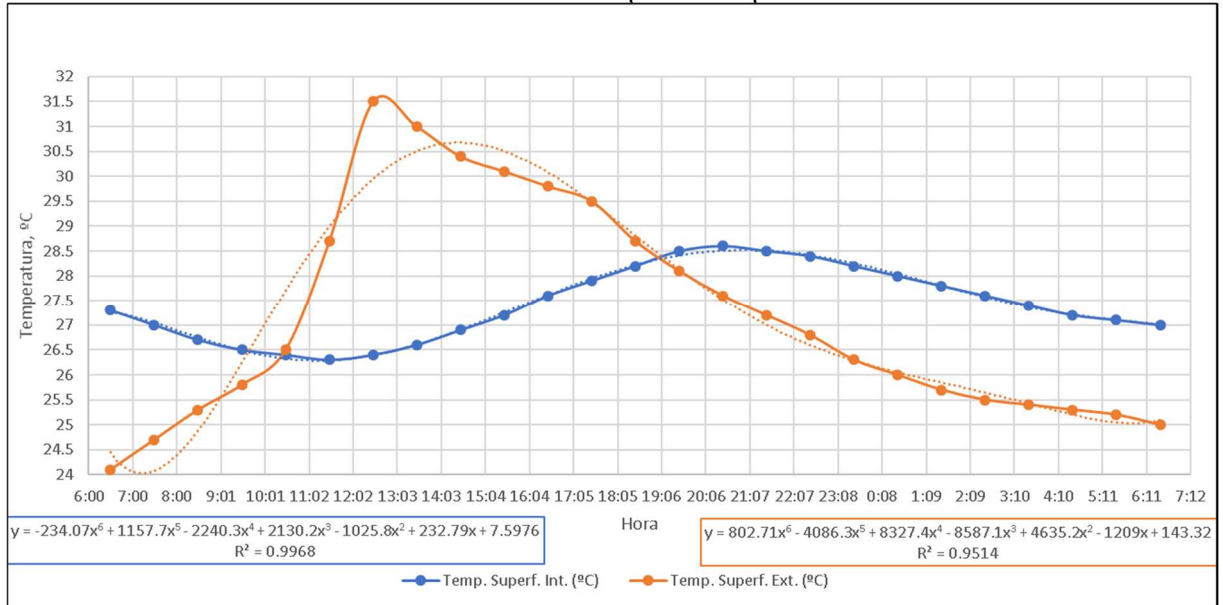
Tabla 54. Valores temperatura por hora E2.

<b>Hora</b>	<b>Temp. Superf. Int. (°C)</b>	<b>Temp. Superf. Ext. (°C)</b>
<b>6:30</b>	27,3	24,1
<b>7:30</b>	27	24,7
<b>8:30</b>	26,7	25,3
<b>9:30</b>	26,5	25,8
<b>10:30</b>	26,4	26,5
<b>11:30</b>	26,3	28,7
<b>12:30</b>	26,4	31,5
<b>13:30</b>	26,6	31
<b>14:30</b>	26,9	30,4
<b>15:30</b>	27,2	30,1
<b>16:30</b>	27,6	29,8
<b>17:30</b>	27,9	29,5
<b>18:30</b>	28,2	28,7
<b>19:30</b>	28,5	28,1
<b>20:30</b>	28,6	27,6
<b>21:30</b>	28,5	27,2
<b>22:30</b>	28,4	26,8
<b>23:30</b>	28,2	26,3
<b>0:30</b>	28	26
<b>1:30</b>	27,8	25,7
<b>2:30</b>	27,6	25,5
<b>3:30</b>	27,4	25,4
<b>4:30</b>	27,2	25,3
<b>5:30</b>	27,1	25,2
<b>6:30</b>	27	25
<b>Valores promedios</b>	27,41	27,21

En lo que se refiere a la onda térmica se produce un amortiguamiento de un 69 % al atravesar el paramento, con un desfase de ocho horas entre la temperatura máxima exterior (31,5 °C) registrada a las 12:30 y la máxima interior (28,6 °C) registrada a las 20:30. El coeficiente de estabilidad térmica (c.e.t.) resultante es 0,31 correspondiente a un local con inercia térmica.

En el gráfico siguiente se observa la curva que sigue cada temperatura con sus respectivas líneas de tendencia.

Gráfico 12. Curva de temperatura por hora E2.



### 8.6.3. Caso de paramento aislado térmicamente por su cara exterior (ensayo E3)

La tabla siguiente muestra la evolución de la temperatura superficial tanto interior como exterior del paramento en el caso de paramento aislado térmicamente por su cara exterior (ensayo de campo 3, E3).

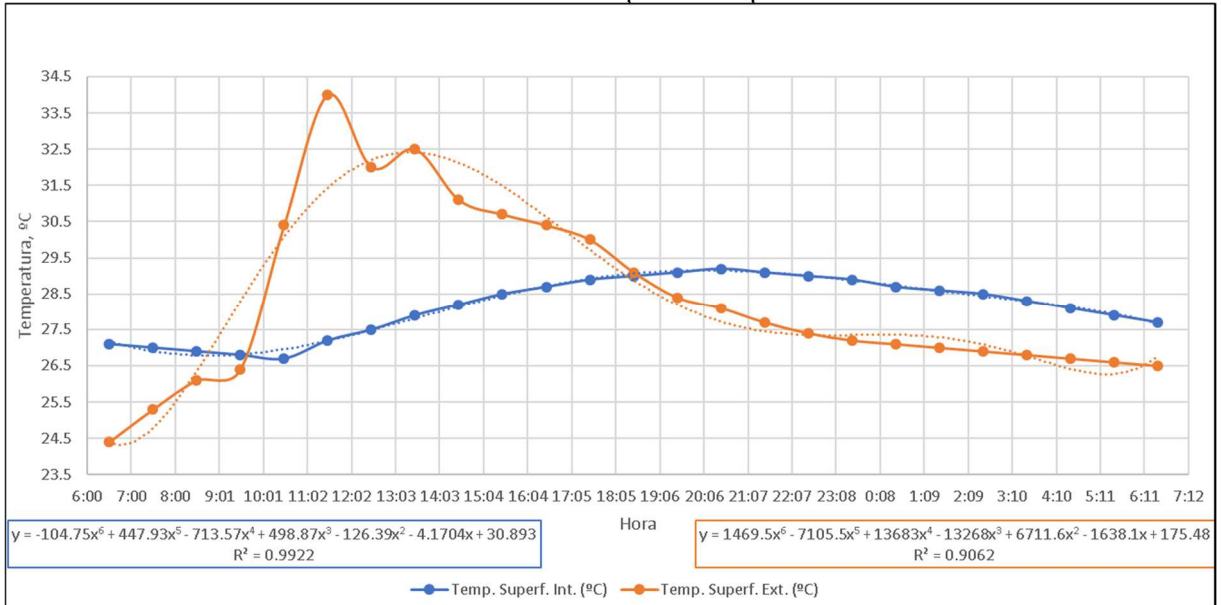
Tabla 55. Valores temperatura por hora E3.

<b>Hora</b>	<b>Temp. Superf. Int. (°C)</b>	<b>Temp. Superf. Ext. (°C)</b>
<b>6:30</b>	27,1	24,4
<b>7:30</b>	27	25,3
<b>8:30</b>	26,9	26,1
<b>9:30</b>	26,8	26,4
<b>10:30</b>	26,7	30,4
<b>11:30</b>	27,2	34
<b>12:30</b>	27,5	32
<b>13:30</b>	27,9	32,5
<b>14:30</b>	28,2	31,1
<b>15:30</b>	28,5	30,7
<b>16:30</b>	28,7	30,4
<b>17:30</b>	28,9	30
<b>18:30</b>	29	29,1
<b>19:30</b>	29,1	28,4
<b>20:30</b>	29,2	28,1
<b>21:30</b>	29,1	27,7
<b>22:30</b>	29	27,4
<b>23:30</b>	28,9	27,2
<b>0:30</b>	28,7	27,1
<b>1:30</b>	28,6	27
<b>2:30</b>	28,5	26,9
<b>3:30</b>	28,3	26,8
<b>4:30</b>	28,1	26,7
<b>5:30</b>	27,9	26,6
<b>6:30</b>	27,7	26,5
<b>Valores promedios</b>	28,14	28,35

El análisis de la onda térmica pone de manifiesto que se produce una amortiguación del 74 % al atravesar el paramento, con un desfase de nueve horas entre la temperatura máxima exterior (34 °C) registrada a las 11:30 y la máxima interior (29,2 °C) registrada a las 20:30. El coeficiente de estabilidad térmica (c.e.t.) resultante es 0,26 correspondiente a un local con inercia térmica.

El gráfico siguiente muestra la curva que siguen las temperaturas con sus respectivas líneas de tendencia.

Gráfico 13. Curva de temperatura por hora E3.



#### 8.6.4. Caso de paramento aislado térmicamente tanto por su cara interior como exterior (ensayo E4)

La tabla siguiente muestra la evolución de las temperaturas superficiales tanto de la cara interior como exterior del paramento con las placas colocadas en el interior y en el exterior (ensayo de campo 4, E4).

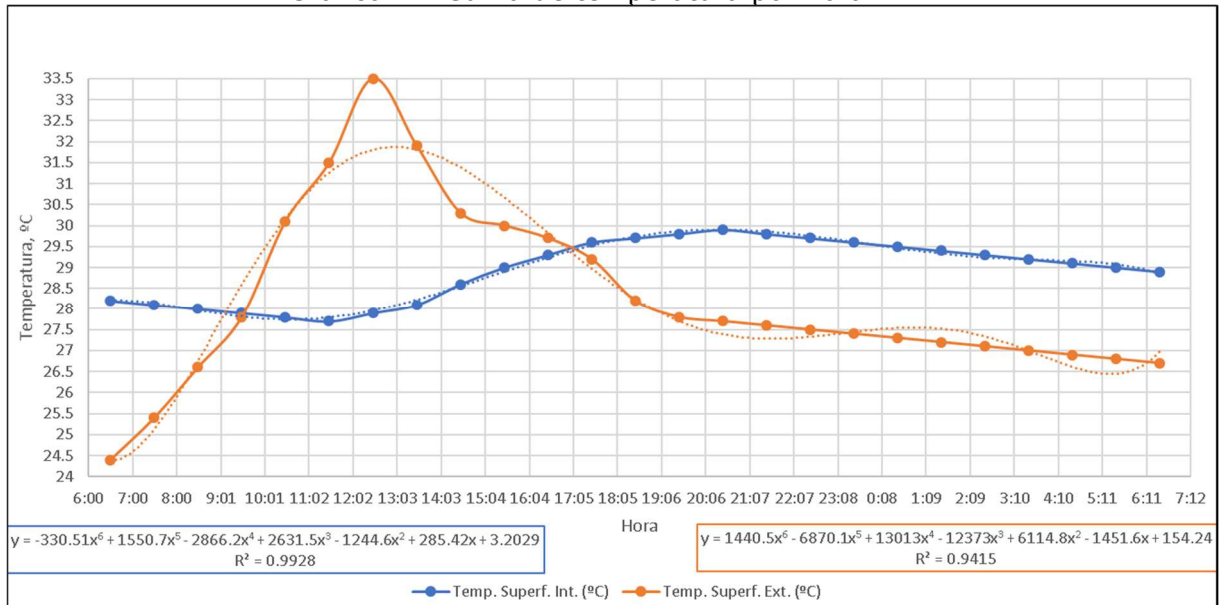
Tabla 56. Valores temperatura por hora E4.

<b>Hora</b>	<b>Temp. Superf. Int. (°C)</b>	<b>Temp. Superf. Ext. (°C)</b>
<b>6:30</b>	28,2	24,4
<b>7:30</b>	28,1	25,4
<b>8:30</b>	28	26,6
<b>9:30</b>	27,9	27,8
<b>10:30</b>	27,8	30,1
<b>11:30</b>	27,7	31,5
<b>12:30</b>	27,9	33,5
<b>13:30</b>	28,1	31,9
<b>14:30</b>	28,6	30,3
<b>15:30</b>	29	30
<b>16:30</b>	29,3	29,7
<b>17:30</b>	29,6	29,2
<b>18:30</b>	29,7	28,2
<b>19:30</b>	29,8	27,8
<b>20:30</b>	29,9	27,7
<b>21:30</b>	29,8	27,6
<b>22:30</b>	29,7	27,5
<b>23:30</b>	29,6	27,4
<b>0:30</b>	29,5	27,3
<b>1:30</b>	29,4	27,2
<b>2:30</b>	29,3	27,1
<b>3:30</b>	29,2	27
<b>4:30</b>	29,1	26,9
<b>5:30</b>	29	26,8
<b>6:30</b>	28,9	26,7
<b>Valores promedios</b>	28,92	28,22

La onda térmica se amortigua un 76 % al atravesar el cerramiento, con un desfase de ocho horas entre la temperatura máxima exterior (33,5 °C) registrada a las 12:30 y la máxima interior (29,9 °C) registrada a las 20:30. El coeficiente de estabilidad térmica (c.e.t.) resultante es 0,24 correspondiente a un local con inercia térmica.

En el gráfico siguiente se puede ver la curva que siguen las temperaturas con sus respectivas líneas de tendencia.

Gráfico 14. Curva de temperatura por hora E4.



Con estos datos de campo se procedió a validar un modelo con el *software* informático *DesignBuilder* para realizar diferentes simulaciones y de esa forma comparar las diferentes estrategias propuestas en esta tesis en las diferentes zonas climáticas dominicanas. En el próximo capítulo se procede a detallar la configuración del modelo informático y las diferentes simulaciones realizadas.

## 9. Modelo y simulaciones computarizadas

### 9.1. Introducción

En este capítulo se describe el *software* informático utilizado con su configuración para esta tesis, las diferentes plantillas que fueron creadas y se presentan los resultados de las diferentes simulaciones realizadas.

Los programas informáticos se utilizan ampliamente en las simulaciones para valorar el confort térmico, así como el comportamiento térmico y energético de edificios sometidos a un régimen dinámico consecuencia de la variación de las condiciones ambientales exteriores e interiores a lo largo del día y de las estaciones del año. De esta forma se pueden analizar y evaluar diferentes configuraciones constructivas considerando la climatología del lugar donde se ubican. Para el desarrollo de esta tesis se utilizó el *software* informático *DesignBuilder* versión 4.7.0.027. (24) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (157) (158) (159) (9) (144)

### 9.2. *DesignBuilder*

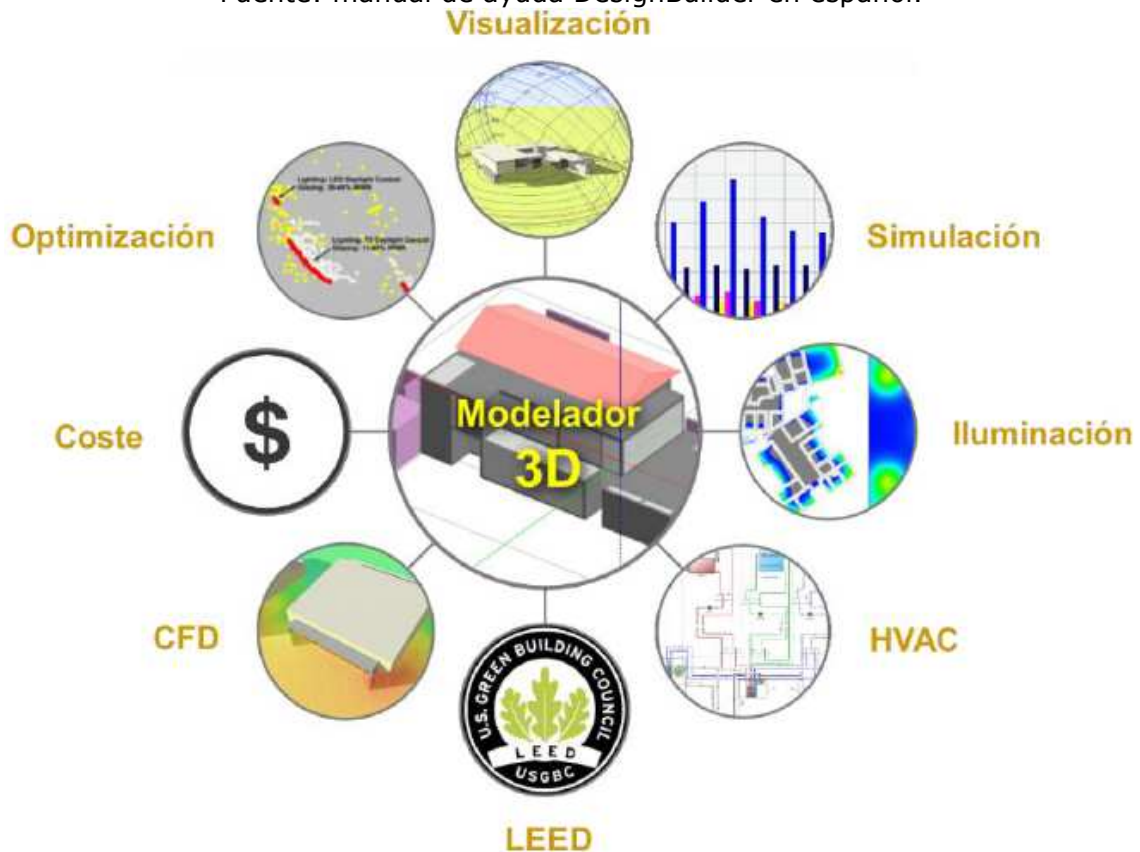
#### 9.2.1. Características generales

El *DesignBuilder* es un *software* especializado en la simulación ambiental y energética de edificios. Sus avanzadas prestaciones permiten evaluar niveles de confort térmico, consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>, entre otros. Concebido para facilitar los procesos de simulación, ofrece diversas herramientas de elevada utilidad para el diseño, consultoría y certificación energética (160).

El programa estructurado modularmente, con un avanzado modelador 3D que funciona como núcleo. Dispone de ocho módulos de análisis, cada uno de los cuales destinado a un tipo de análisis específico. Los módulos se integran entre sí, lo que facilita el análisis detallado del desempeño ambiental y energético de los edificios. Los ocho módulos, como puede observarse en la figura siguiente, son los siguientes (160):

1. Módulo Visualización;
2. Módulo *EnergyPlus*;
3. Módulo Iluminación Natural;
4. Módulo Coste;
5. Módulo Optimización;
6. Módulo HVAC;
7. Módulo LEED;
8. Módulo CFD.

Figura 66. Módulos del programa informático *DesignBuilder*.  
Fuente: manual de ayuda *DesignBuilder* en español.



El *DesignBuilder* posibilita aquellos análisis relacionados con la valoración ambiental y energética de los edificios, incluyendo sus sistemas de climatización. Algunos de ellos se indican a continuación (160):

- Calcular, mediante simulaciones dinámicas con datos climáticos reales, los consumos energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociados a los sistemas de climatización y agua caliente sanitaria, los sistemas de iluminación artificial y los equipos.
- Determinar la capacidad de los sistemas mecánicos de calefacción y refrigeración, cuando estos sean necesarios para mantener condiciones adecuadas de confort de los edificios, mediante datos específicos de diseño.
- Evaluar los niveles de confort que se pueden lograr en edificios sin sistemas de climatización mecánicos, es decir, funcionando en modo pasivo.
- Hacer análisis comparativos de distintas configuraciones arquitectónicas, incluyendo la forma general, la implantación en el sitio, la orientación, la distribución espacial interior y la disposición del acristalamiento.
- Comparar el impacto ambiental y energético de diversos materiales y sistemas constructivos empleados en la envolvente de los edificios, incluyendo materiales de cambio de fase, cubiertas vegetales y fachadas ventiladas.
- Comprobar las mejoras ambientales y energéticas logradas con diferentes sistemas de acristalamiento, incluyendo el tipo de vidrio (claro, reflectante, bajo emisivo, espectral) el número de hojas y las características de marcos y divisores.



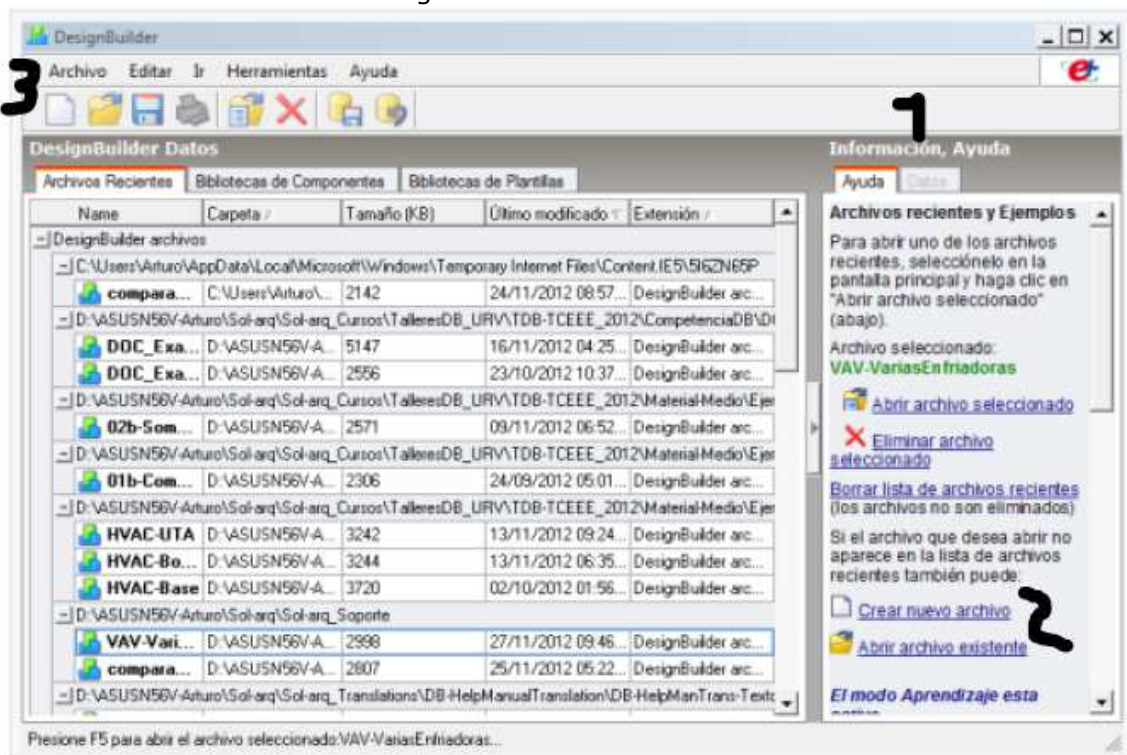
- Evaluar el impacto ambiental y energético de dispositivos de sombreado y control solar, como lamas, voladizos, laterales, persianas y pantallas. Algunos de estos elementos se pueden colocar en el exterior, el interior o entre vidrios.
- Evaluar el impacto de la ventilación natural como recurso de enfriamiento pasivo, ya sea como estrategia única o en combinación con sistemas mecánicos de climatización (modo mixto).
- Determinar el potencial de aprovechamiento de la luz natural para reducir los consumos asociados a los sistemas de iluminación artificial, mediante el uso de sensores lumínicos y controles automatizados.
- Determinar de manera más detallada el desempeño lumínico del edificio, incluyendo mapas de distribución y tablas de factores de luz diurna, mediante el módulo de Iluminación Natural (que emplea el motor de cálculo *Radiance*). Incluye reportes para LEED EQ8.1, BREAAAM HW1 y *Green Star* IEQ4.
- Evaluar y comparar el desempeño específico de un amplio rango de sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación, modelando a detalle cada uno de sus componentes, mediante el módulo HVAC Detallado. Incluye todos los sistemas HVAC de referencia del estándar ASHRAE 90.1, por lo que se puede usar en procesos de certificación LEED.
- Evaluar de manera detallada las condiciones ambientales en los espacios exteriores e interiores de los edificios, incluyendo aspectos como el movimiento del aire (dirección, velocidad, presión) y la distribución de temperaturas, mediante el módulo CFD.
- Desarrollar análisis paramétricos para evaluar de manera simultánea hasta dos variables de diseño (por ejemplo el tipo y proporción de acristalamiento). Este tipo de análisis puede ser muy útil en las fases iniciales del proyecto para determinar las opciones de diseño más adecuadas.
- Llevar a cabo análisis de optimización, mediante algoritmos genéticos, para evaluar un rango relativamente amplio de variables de diseño y determinar cuáles son las más eficientes para lograr dos objetivos (en ocasiones conflictivos) como reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y minimizar los costes de inversión.

### 9.2.2. Configuración del modelo utilizado

A continuación se presenta la configuración general del *DesignBuilder* utilizado en esta tesis. Antes de realizar cada simulación se definen los parámetros particularizados para los diferentes análisis que se describen en cada caso simulado.

Al abrir el programa, aparece la llamada "Pantalla inicial" desde la que se accede a un archivo existente o se puede crear uno nuevo cliqueando en el panel "Información, Ayuda" (paso 1) y después en el icono "Crear nuevo archivo" (paso 2), en la barra de herramientas, o yendo al menú *Archivo > Nuevo archivo* (paso 3). La siguiente imagen recoge lo expuesto.

Figura 67. Pantalla inicial.

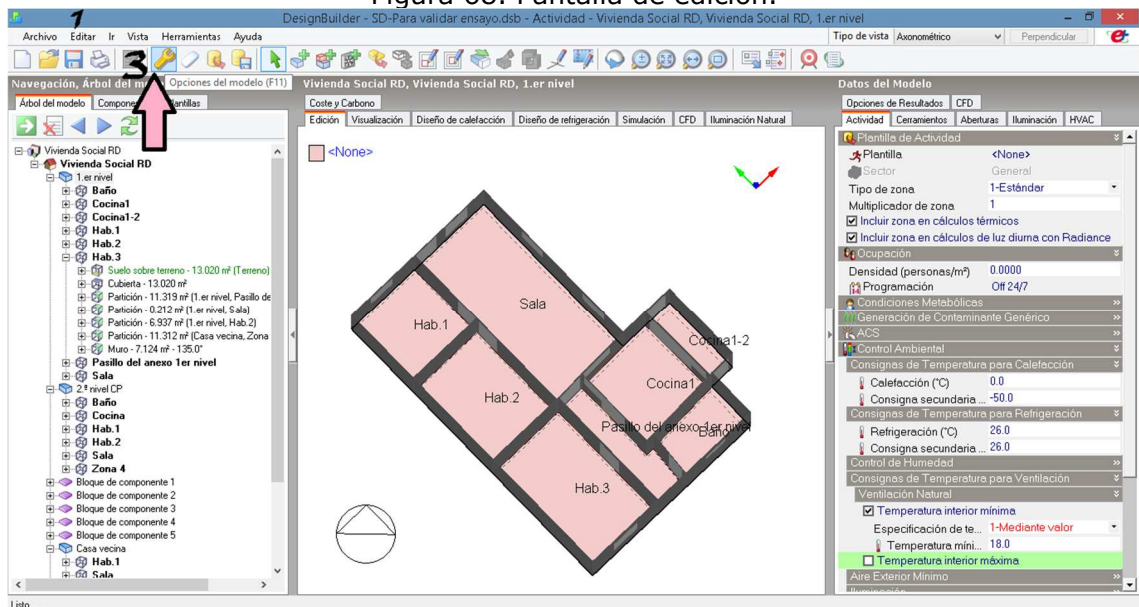


Una vez abierto el archivo deseado se accede a una segunda pantalla denominada "Pantalla de edición" en la que se crea el modelo 3D del edificio, se asignan los datos de este, se definen los parámetros particularizados para los diferentes análisis, se indican los resultados que se desean generar con las simulaciones, etc.

Para acceder a las opciones de configuración del modelo, se hace clic en el icono "Opciones del modelo". Esta función permite establecer el nivel de detalle de las simulaciones, los criterios de cálculo y simulación, entre otros aspectos. Para abrir el diálogo de "Opciones del modelo" se pueden utilizar tres opciones distintas:

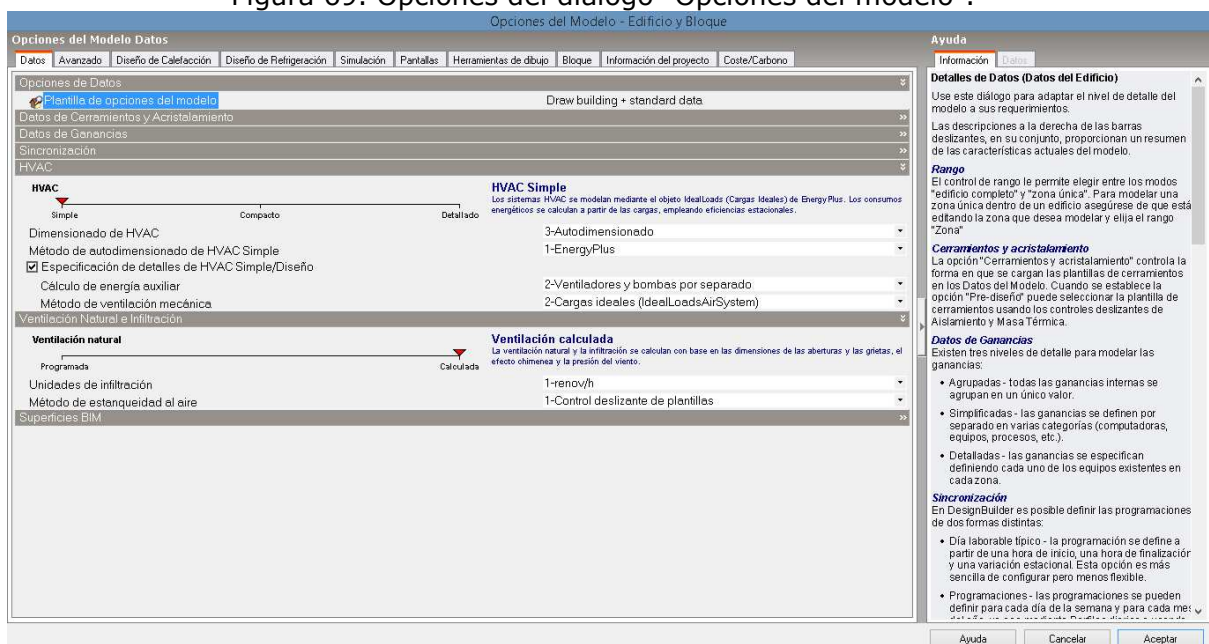
1. Desde el menú *Editar > Opciones del modelo*.
2. Presionando la tecla F11.
3. Haciendo clic en el icono correspondiente de la barra de herramientas como se muestra en la imagen siguiente.

Figura 68. Pantalla de edición.



Una vez abierto el diálogo "Opciones del modelo" se muestra la pantalla con las siguientes pestañas: "Datos", "Avanzado", "Diseño de calefacción", "Diseño de refrigeración", "Simulación", "Pantallas", "Herramientas de dibujo", "Bloque" e "Información del proyecto". Como se muestra en la figura siguiente.

Figura 69. Opciones del diálogo "Opciones del modelo".



### 9.2.2.1. Pestaña “Datos”

Las opciones disponibles en la pestaña de “Datos” permiten regular el nivel de detalle requerido en las simulaciones. Los textos ubicados a la derecha de cada control deslizante (en azul), proporcionan información básica sobre las opciones disponibles.

La figura siguiente presenta las opciones del modelo de esta tesis seleccionadas en la pestaña “Datos” de la configuración “Opciones del Modelo”.

Figura 70. Pestaña “Datos” de “Opciones del modelo”.

The screenshot displays the 'Datos' (Data) tab within the 'Opciones del Modelo' (Model Options) configuration window. The interface is organized into several sections, each with a set of options and a description:

- Opciones de Datos:** Includes 'Plantilla de opciones del modelo' (Draw building + standard data).
- Datos de Cerramientos y Acristalamiento:** Features a slider for 'Datos de cerramientos y acristalamiento' (set to 'General') and a dropdown for 'Plantillas de cerramientos generales' (set to '1-Combinados').
- Datos de Ganancias:** Features a slider for 'Datos de Ganancias' (set to 'Simplificadas') and dropdowns for 'Ganancias latentes por ocupación' (set to '1-Cálculo dinámico') and 'Unidades de ganancias por iluminación' (set to '2-Watts por m² @ 100 Lux').
- Sincronización:** Features a slider for 'Sincronización' (set to 'Programaciones') and a checkbox for 'Las ganancias internas operan con la ocupación' (unchecked).
- HVAC:** Features a slider for 'HVAC' (set to 'Simple') and dropdowns for 'Dimensionado de HVAC' (set to '3-Autodimensionado'), 'Método de autodimensionado de HVAC Simple' (set to '1-EnergyPlus'), and 'Método de ventilación mecánica' (set to '2-Cargas ideales (IdealLoadsAirSystem)'). A checkbox for 'Especificación de detalles de HVAC Simple/Diseño' is checked.
- Ventilación Natural e Infiltración:** Features a slider for 'Ventilación natural' (set to 'Calculada') and dropdowns for 'Unidades de infiltración' (set to '1-renov/h') and 'Método de estanqueidad al aire' (set to '1-Control deslizante de plantillas'). A checkbox for 'Superficies BIM' is checked.

### 9.2.2.2. Pestaña “Avanzado”

En la pestaña “Avanzado” se puede establecer opciones relacionadas con la simplificación del modelo, el control de la ventilación natural y el modelado de la iluminación, entre otros.

La figura siguiente presenta las opciones del modelo de esta tesis seleccionadas en la pestaña “Avanzado” de la configuración “Opciones del Modelo”.

Figura 71. Pestaña “Avanzado” de “Opciones del modelo”.

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque
<b>Simplificación</b>							
<input type="checkbox"/> Agrupar zonas con la misma actividad							
<input type="checkbox"/> Agrupar zonas conectadas por huecos							
<input type="checkbox"/> Agrupar zonas por selección							
<input type="checkbox"/> Agrupar ventanas similares en una superficie							
<input type="checkbox"/> Agrupar grietas similares en una superficie							
<b>Ajustes de adyacencia</b>							
Tolerancia de separación para adyacencias (m)							0.500
Tolerancia angular de adyacencia (°)							5.0
<input type="checkbox"/> Adyacencias de bloques de componente estándar							
Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque
<b>Simplificación</b>							
<b>Ajustes de adyacencia</b>							
<b>Ventilación Natural</b>							
<input checked="" type="checkbox"/> Modelar flujo de aire a través de huecos y particiones virtuales							
<b>Calculada</b>							
Factor de viento							1.00
Coeficiente de descarga para ventanas abiertas y huecos							0.650
<input type="checkbox"/> Modular áreas de apertura							
<b>Programada</b>							
<input type="checkbox"/> Caudal de aire a través de aberturas internas							
<b>Iluminación</b>							
Método de iluminación natural							1-Detallado
<b>Filtros</b>							
Excluir superficies menores a (m²)							0.010000
<b>Bloque de Componente</b>							
Proporción de las dos áreas mayores para bloque plano							0.99
Selección de superficie del bloque de componente plano							2-Mas bajo

### 9.2.2.3. Pestaña "Diseño de refrigeración"

Las opciones disponibles en esta pestaña permiten controlar los cálculos de "Diseño de refrigeración".

La figura siguiente presenta las opciones del modelo de esta tesis seleccionadas en la pestaña "Diseño de refrigeración" de las "Opciones del Modelo".

Figura 72. Pestaña "Diseño de refrigeración" de "Opciones del modelo".

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque	Información del	
<b>Día de Diseño de Refrigeración</b>									
Día								15	
Mes								Jul	
Tipo de día en las programaciones compactas								9-SummerDesignDay	
<b>Opciones de Cálculo</b>									
Método de simulación								1-EnergyPlus	
Tipo de control de la temperatura								1-Temperatura del aire	
<input checked="" type="checkbox"/> Excluir la ventilación natural en todas las zonas (la infiltración siempre es incluida)									
<input checked="" type="checkbox"/> Excluir la ventilación mecánica en todas las zonas									
<b>Dimensionado del Sistema</b>									
Coefficiente de seguridad								1.15	
Método de dimensionado								1-ASHRAE	
Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque	Información del proyecto	Coste/Cat
<b>Día de Diseño de Refrigeración</b>									
<b>Opciones de Cálculo</b>									
<b>Dimensionado del Sistema</b>									
<b>Soleamiento</b>									
<input type="checkbox"/> Incluir todos los edificios en el cálculo de sombreado									
<input checked="" type="checkbox"/> Modelar reflexiones (también sombreado sobre el terreno)									
Distribución solar								3-Completa interior y exterior (*avanzado*)	
<input type="checkbox"/> Verificar la existencia de zonas no convexas									
<b>Resultados</b>									
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir zonas desocupadas en totales y promedios de bloques y edificio									
<input type="checkbox"/> Informe									
<b>Avanzado</b>									
<b>Solución General</b>									
Convergencia de temperaturas superficiales interiores								0.0020	
Convergencia de temperaturas								0.4000	
Convergencia de cargas								0.0400	
<b>Convección</b>									
Algoritmo de convección interna								6-TARP	
Algoritmo de convección externa								6-DOE-2	
<b>Sombreado</b>									
Número máximo de "traslapes de sombras"								15000	
Algoritmo de recorte de polígono								1-Sutherland Hodgman	
<b>Otro</b>									
<input type="checkbox"/> Las superficies "dentro de una zona" se consideran adiabáticas									

#### 9.2.2.4. Pestaña "Simulación"

Las opciones disponibles en esta pestaña permiten controlar las "Simulaciones" dinámicas efectuadas con el módulo *EnergyPlus*.

La figura siguiente presenta las opciones del modelo de esta tesis seleccionadas en la pestaña "Simulación" de la configuración "Opciones del Modelo".

Figura 73. Pestaña "Simulación" de "Opciones del modelo".

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque	Información del proyecto	Coste/Carb
<b>Opciones de Simulación</b>									
Desde									
Día inicial	9								
Mes inicial	May								
Hasta									
Día final	10								
Mes final	May								
<b>Opciones de Cálculo</b>									
Método de simulación	1-EnergyPlus								
Etapas de simulación por hora	2								
Tipo de control de la temperatura	1-Temperatura del aire								
<b>Soleamiento</b>									
<input type="checkbox"/>	Incluir todos los edificios en el cálculo de sombreado								
<input checked="" type="checkbox"/>	Modelar reflexiones (también sombreado sobre el terreno)								
Distribución solar	3-Completa interior y exterior (*avanzado*)								
<input type="checkbox"/>	Verificar la existencia de zonas no convexas								
Intervalo de sombreado (días)	1								
Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque	Información del proyecto	Coste/Carbono
<b>Avanzado</b>									
<b>Solución General</b>									
Algoritmo de solución	1-Función de Transferencia por Conducción (CTF)								
<input checked="" type="checkbox"/>	Permitir que los cerramientos individuales sobrescriban el algoritmo de solución								
<b>Parámetros de Diferencias Finitas</b>									
Método de diferencias finitas	1-Fully implicit first order								
Constante de discretización de espacio	1.000								
Factor de relajación	1.000								
Convergencia de temperaturas superficiales interiores	0.0020								
<b>Airflow Network</b>									
Iteraciones máximas	1000								
Tolerancia absoluta de convergencia de caudales de aire (kg/s)	0.000001000								
Tolerancia relativa de convergencia de caudales de aire	0.000100000								
<b>Convección</b>									
Algoritmo de convección interna	6-TARP								
Algoritmo de convección externa	6-DOE-2								
<b>Pre-simulación (Warmup)</b>									
Días mínimos de pre-simulación	6								
Días máximos de pre-simulación	25								
Tolerancia de convergencia de temperaturas	0.400000								
Tolerancia de convergencia de cargas	0.040000								
<b>Sombreado</b>									
Número máximo de "traslapes de sombras"	15000								
Algoritmo de recorte de polígono	1-Sutherland Hodgman								
<b>Incluir Datos IDF</b>									
<input type="checkbox"/>	Archivo IDF 1								
<input type="checkbox"/>	Archivo IDF 2								
<b>Otro</b>									
<input type="checkbox"/>	Las superficies "dentro de una zona" se consideran adiabáticas								
Velocidad del aire para cálculo del confort (m/s)	0.1370								

### Cont. figura 74. Pestaña "Simulación" de "Opciones del modelo".

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque	Información c
-------	----------	-----------------------	-------------------------	------------	-----------	------------------------	--------	---------------

Opciones de Simulación

Opciones de Cálculo

Soleamiento

Autodimensionado de HVAC detallado

Avanzado

Resultados

Datos de zonas en edificio y bloque

Incluir zonas desocupadas en totales y promedios de bloques y edificio

Permitir resultados personalizados

Resultados con Gráficas

Energía

Transferencia de calor en superficies

Ganancias internas y solares

Cargas y consumos HVAC

Cargas latentes

Confort y Ambiente

Periodo de informe 1-Todos los periodos

Ambiental

Renovaciones de aire

Fanger

Pierce, dos-nodos

Kansas State University, dos-nodos

Adaptativo, Estándar ASHRAE 55

Adaptativo, Estándar CEN 15251

CIBSE TM52

Simple, Estándar ASHRAE 55

Distribución de temperaturas

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque
-------	----------	-----------------------	-------------------------	------------	-----------	------------------------	--------

Avanzado

Resultados

Datos de zonas en edificio y bloque

Incluir zonas desocupadas en totales y promedios de bloques y edificio

Permitir resultados personalizados

Resultados con Gráficas

Resultados Detallados de Luz Natural

Mapa de luz natural

Luz natural en los puntos de referencia

Tablas de Resumen

Unidades de resúmenes de resultados 1-kWh

Informes de Resumen Anual

All Summary

Resumen LEED

Annual Building Utility Performance Summary (ABUPS)

Demand End Use Components Summary

Resumen de ganancias de calor sensible

Input Verification and Results Summary

Climatic Data Summary

Equipment Summary

Envelope Summary

Surface Shadowing Summary

Shading Summary

Lighting Summary

HVAC Sizing Summary

System Summary

Component Sizing Summary

Outdoor Air Summary

Object Count Summary

Component Cost Economics Summary

Informes de Resumen Mensual



Cont. figura 74. Pestaña "Simulación" de "Opciones del modelo".

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque
Resultados con Gráficas							
Resultados Detallados de Luz Natural							
Tablas de Resumen							
Unidades de resúmenes de resultados							1-kWh
Informes de Resumen Anual							
Informes de Resumen Mensual							
<input type="checkbox"/> All Monthly <input type="checkbox"/> Zone Cooling Summary Monthly <input type="checkbox"/> Zone Heating Summary Monthly <input type="checkbox"/> Zone Electric Summary Monthly <input type="checkbox"/> Space Gains Monthly <input type="checkbox"/> Peak Space Gains Monthly <input type="checkbox"/> Space Gain Components At Cooling Peak Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption Electricity Natural Gas Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption Electricity Generated Propane Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption Diesel Fuel Oil Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption District Heating Cooling Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption Coal Gasoline Monthly <input checked="" type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Electricity Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Natural Gas Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Diesel Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption FuelOil Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Coal Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Propane Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Gasoline Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Other Fuels Monthly <input checked="" type="checkbox"/> Peak Energy End Use Electricity Part1 Monthly <input checked="" type="checkbox"/> Peak Energy End Use Electricity Part2 Monthly <input type="checkbox"/> Electric Components Of Peak Demand Monthly							
Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque
Avanzado							
Resultados							
<input checked="" type="checkbox"/> Datos de zonas en edificio y bloque <input checked="" type="checkbox"/> Incluir zonas desocupadas en totales y promedios de bloques y edificio <input checked="" type="checkbox"/> Permitir resultados personalizados							
Resultados con Gráficas							
Resultados Detallados de Luz Natural							
<input type="checkbox"/> Mapa de luz natural <input type="checkbox"/> Luz natural en los puntos de referencia							
Tablas de Resumen							
Unidades de resúmenes de resultados							1-kWh
Informes de Resumen Anual							
<input type="checkbox"/> All Summary <input type="checkbox"/> Resumen LEED <input checked="" type="checkbox"/> Annual Building Utility Performance Summary (ABUPS) <input checked="" type="checkbox"/> Demand End Use Components Summary <input checked="" type="checkbox"/> Resumen de ganancias de calor sensible <input checked="" type="checkbox"/> Input Verification and Results Summary <input checked="" type="checkbox"/> Climatic Data Summary <input checked="" type="checkbox"/> Equipment Summary <input checked="" type="checkbox"/> Envelope Summary <input type="checkbox"/> Surface Shadowing Summary <input type="checkbox"/> Shading Summary <input checked="" type="checkbox"/> Lighting Summary <input checked="" type="checkbox"/> HVAC Sizing Summary <input checked="" type="checkbox"/> System Summary <input checked="" type="checkbox"/> Component Sizing Summary <input checked="" type="checkbox"/> Outdoor Air Summary <input checked="" type="checkbox"/> Object Count Summary <input type="checkbox"/> Component Cost Economics Summary							
Informes de Resumen Mensual							

Cont. figura 74. Pestaña "Simulación" de "Opciones del modelo".

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque
Resultados con Gráficas							
Resultados Detallados de Luz Natural							
Tablas de Resumen							
Unidades de resúmenes de resultados							1-kWh
Informes de Resumen Anual							
Informes de Resumen Mensual							
<input type="checkbox"/> All Monthly <input type="checkbox"/> Zone Cooling Summary Monthly <input type="checkbox"/> Zone Heating Summary Monthly <input type="checkbox"/> Zone Electric Summary Monthly <input type="checkbox"/> Space Gains Monthly <input type="checkbox"/> Peak Space Gains Monthly <input type="checkbox"/> Space Gain Components At Cooling Peak Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption Electricity Natural Gas Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption Electricity Generated Propane Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption Diesel Fuel Oil Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption District Heating Cooling Monthly <input type="checkbox"/> Energy Consumption Coal Gasoline Monthly <input checked="" type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Electricity Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Natural Gas Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Diesel Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption FuelOil Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Coal Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Propane Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Gasoline Monthly <input type="checkbox"/> End Use Energy Consumption Other Fuels Monthly <input checked="" type="checkbox"/> Peak Energy End Use Electricity Part1 Monthly <input checked="" type="checkbox"/> Peak Energy End Use Electricity Part2 Monthly <input type="checkbox"/> Electric Components Of Peak Demand Monthly							
Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	BI
Opciones de Simulación							
Opciones de Cálculo							
Soleamiento							
Autodimensionado de HVAC detallado							
Avanzado							
Resultados							
<input checked="" type="checkbox"/> Datos de zonas en edificio y bloque <input checked="" type="checkbox"/> Incluir zonas desocupadas en totales y promedios de bloques y edificio <input checked="" type="checkbox"/> Permitir resultados personalizados							
Resultados con Gráficas							
Resultados Detallados de Luz Natural							
Tablas de Resumen							
Resultados Varios							
<input type="checkbox"/> Temperaturas de nodo superficial (solo para el método de diferencias finitas) <input checked="" type="checkbox"/> Temperaturas del sistema HVAC <input checked="" type="checkbox"/> Caudales máxicos del sistema HVAC <input checked="" type="checkbox"/> Tasas de humedad del sistema HVAC <input type="checkbox"/> Resultados SQLite <input checked="" type="checkbox"/> Generación de modelo DXF <input checked="" type="checkbox"/> Detalles de cerramientos y superficies <input checked="" type="checkbox"/> Archivo RDD							
Tolerancias de Tiempo con Consignas no Alcanzadas							
Tolerancia de tiempo con consigna de calefacción no alcanzada							1.11
Tolerancia de tiempo con consigna de refrigeración no alcanzada							1.11

### 9.2.2.5. Pestaña "Pantalla"

Las opciones disponibles en esta pestaña permiten controlar parte de la información disponible en las diferentes pantallas del programa.

La figura siguiente presenta las opciones del modelo de esta tesis seleccionadas en la pestaña "Pantalla" de la configuración "Opciones del Modelo".

Figura 74. Pestaña "Pantalla" de "Opciones del modelo".

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	Bloque	Inforn
<b>Tipo de Análisis a Desarrollar</b>								
Tipo de análisis								1-EnergyPlus
<b>Pantalla de Edición</b>								
Dinámicos								1-Renderizado
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar leyendas de zona								
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar superficies internas de las zonas								
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar muros exteriores								
<input type="checkbox"/> Mostrar suelos de volúmenes internos de zonas								
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar perímetros de suelos internos de zonas								
<input checked="" type="checkbox"/> Editar datos de bloque								
<input type="checkbox"/> Incluir planta importada (dibujo 2D) en la vista ajustada a la pantalla								
<input type="checkbox"/> Mostrar planta importada (dibujo 2D) en los niveles de zona y superficie								
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar dispositivos de sombreado								
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar ventanas								
Coloración del suelo de zona en el nivel bloque								1-Actividad
<b>Visualización</b>								
Dinámicos								1-Renderizado
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar sombras								
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar norte								
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar plano del terreno								
Vista (*)								50
<input type="checkbox"/> Mejorar resolución								

### 9.2.2.6. Pestaña "Herramientas de dibujo"

En esta pestaña es posible activar o desactivar de manera predeterminada las herramientas auxiliares que ofrece *DesignBuilder* para crear los modelos geométricos.

La figura siguiente presenta las opciones del modelo de esta tesis seleccionadas en la pestaña "Herramientas de dibujo" de la configuración "Opciones del Modelo".

Figura 75. Pestaña "Herramientas de dibujo" de "Opciones del modelo".

Datos	Avanzado	Diseño de Calefacción	Diseño de Refrigeración	Simulación	Pantallas	Herramientas de dibujo	BI
<b>Dibujar Bloque</b>							
<input checked="" type="checkbox"/> Auto-completar bloque							
<input type="checkbox"/> Generar huecos automáticamente a través de particiones entre bloques							
<b>Referencias de Dirección</b>							
<input checked="" type="checkbox"/> Referencia eje-X							
<input checked="" type="checkbox"/> Referencia eje-Y							
<input type="checkbox"/> Referencia eje-Z							
<input type="checkbox"/> Referencia paralela							
<input type="checkbox"/> Referencia perpendicular							
<b>Referencias de Punto</b>							
<input checked="" type="checkbox"/> Referencia punto final							
<input checked="" type="checkbox"/> Referencia punto medio							
<input checked="" type="checkbox"/> Referencia borde							
<input checked="" type="checkbox"/> Referencia DXF							
<input type="checkbox"/> Referencia a perímetros inferiores							
<input checked="" type="checkbox"/> Incremento							
Incremento (m)							0.01
<b>Guías de Dibujo</b>							
<input checked="" type="checkbox"/> Guías de dibujo eje-X							
<input checked="" type="checkbox"/> Guías de dibujo eje-Y							
<b>Rotación de Objeto</b>							
Incremento angular de rotación (°)							1
<b>Transportador</b>							
<input type="checkbox"/> Transportador							
<b>Edición misceláneos</b>							
<input checked="" type="checkbox"/> Zonificación automática de bloques							
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir automáticamente los patios de bloques inferiores							

### 9.3. Plantillas

*DesignBuilder* trabaja con plantillas. Estas plantillas están disponibles y muy bien definidas para situaciones estándar de varios países, pero para la República Dominicana no están disponibles, lo que supone un aporte de esta tesis la creación de plantillas para situaciones, materiales y climas propios dominicanos. En esta sección se detallan las plantillas creadas.

#### 9.3.1. Plantillas de sitio

Para acceder a las plantillas de sitio hay que ir a la pestaña "Datos del sitio" desde la "Pantalla de edición".

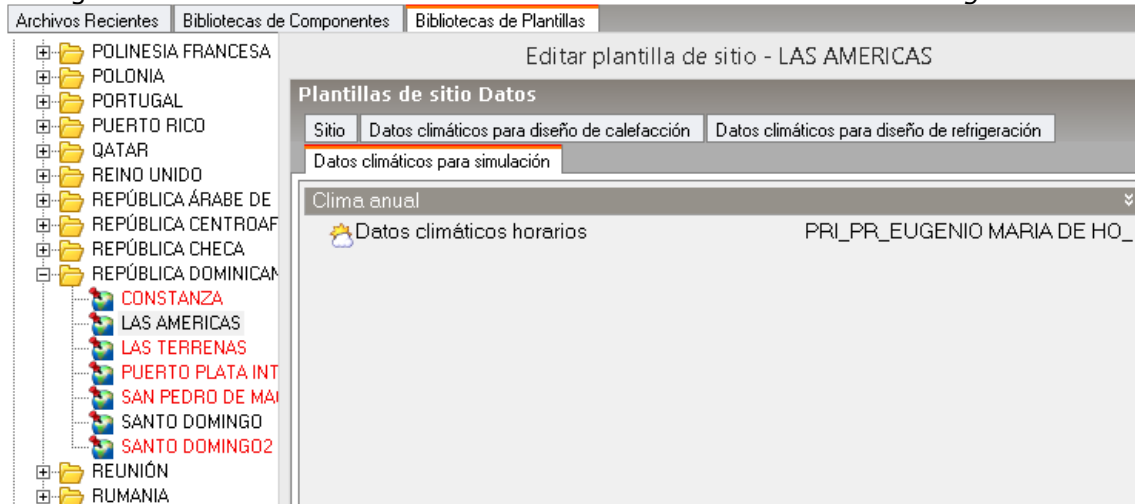
Como se muestra en la primera figura de las dos siguientes, si se busca entre las opciones de plantillas de sitio que trae *DesignBuilder* se puede encontrar una carpeta que dice "REPÚBLICA DOMINICANA" y dentro de estas se ven dos opciones "LAS AMÉRICAS" y "SANTO DOMINGO" (las que están en rojo son algunas de las creadas para esta tesis), estas dos opciones en la pestaña "Sitio" tienen los datos "General", "Hora y horario de verano" correspondientes a los reales del país dominicano. Pero los demás datos climáticos de las otras tres pestañas exigidos en la plantilla son propios del archivo climático de las coordenadas "EUGENIO MARÍA DE HOSTOS" de Puerto Rico como se puede ver en la segunda figura. Por lo tanto, se procedió a crear las plantillas de sitios con datos climáticos propios de las coordenadas dominicanas.

Figura 76. Plantilla de sitio de la "REPÚBLICA DOMINICANA" en *DesignBuilder*.

The screenshot shows the 'Bibliotecas de Plantillas' tab in DesignBuilder. The left pane shows a tree view of templates, with 'REPÚBLICA DOMINICANA' expanded to show 'LAS AMERICAS' and 'SANTO DOMINGO2' in red. The main pane shows the 'Editar plantilla de sitio - LAS AMERICAS' window. The 'Datos climáticos para simulación' tab is active, and the 'Sitio' sub-tab is selected. The configuration table below shows the following data:

Plantillas de sitio Datos	
Datos climáticos para simulación	
Sitio	
<b>General</b>	
<b>Nombre</b>	<b>LAS AMERICAS</b>
País	REPÚBLICA DOMINICANA
Fuente	ASHRAE/TMY3
WMO	784850
Zona climática ASHRAE	1A
Clasificación Köppen	Am
Latitud (°)	18.43
Longitud (°)	-69.67
Elevación sobre el nivel del mar (m)	18.0
Presión estándar (kPa)	101.1
<b>Hora y horario de verano</b>	
Zona horaria	(GMT-04:00) Cuiaba
Inicio del Invierno	Oct
Final del Invierno	Mar
Inicio del Verano	Apr
Final del Verano	Sep
<b>Códigos Energéticos</b>	
Región legislativa	DOMINICAN REPUBLIC

Figura 77. Plantilla de sitio de la "REPÚBLICA DOMINICANA" en *DesignBuilder*.



### 9.3.1.1. Archivos climáticos

Para los datos climáticos de la "Plantilla de sitio" y para definir las condiciones ambientales externas durante las simulaciones dinámicas, el *software DesignBuilder* emplea archivos de datos climáticos horarios con el formato *EnergyPlus* (extensión .epw). Los componentes de "Clima horario" sirven fundamentalmente para vincular estos archivos a los modelos de simulación (160). Según el manual de *DesignBuilder* dichos archivos suelen tener las siguientes características:

- Contienen datos hora a hora, para un año completo, de factores atmosféricos.
- Representan las condiciones climáticas de un año "típico" (TMY por sus siglas en inglés, *Typical Meteorological Year*) en una localidad específica. Esto se hace sintetizando información de largos periodos, por ejemplo 10, 20 o 30 años. La síntesis suele incluir la selección individual de los meses que representan mejor los patrones normales, empleando factores de ponderación basados en la temperatura, la humedad, el viento y la radiación solar.
- Se derivan de registros horarios llevados a cabo en el lugar por oficinas meteorológicas y/o de servicios climáticos, compilados con un método y un formato específicos. Como ejemplos podemos mencionar los paquetes de datos TMY2 de Estados Unidos de América, CWEC de Canadá y TRY (CEC 1985) de Europa.

*EnergyPlus* ofrece una base de datos con archivos de datos climáticos en formato .epw para más de 2100 localidades en todo el mundo, pero no están los datos para las coordenadas dominicanas. *DesignBuilder* ofrece un procesador de archivos de datos climáticos, el cual se basa en el programa auxiliar de *EnergyPlus Weather Converter*. Este procesador permite convertir al formato .epw una gran cantidad de archivos climáticos en otros formatos, como .csv, .tmy2, .iwec, etc. Esta aplicación de procesador de archivos climáticos se puede acceder desde el menú "Herramientas" del *software DesignBuilder* (160).

Para utilizar el procesador de archivos climáticos se deben tener los datos principales requeridos por *EnergyPlus*, los datos requeridos son (161):

1. Temperatura del aire.
2. Temperatura del punto de rocío.
3. Humedad relativa.
4. Presión atmosférica.
5. Radiación solar horizontal global (GHI por sus siglas en inglés).
6. Radiación solar horizontal difusa (DHI por sus siglas en inglés).
7. Radiación normal directa (DNI por sus siglas en inglés).
8. Velocidad del viento.
9. Dirección del viento.
10. Cobertura de nubes.

Para crear los archivos de los observatorios meteorológicos de la República Dominicana, se obtuvieron los años típicos (TMY) de cada observatorio y de cada día de los 18 años de trabajo de esta tesis (1998-2015) como se explicó en el capítulo 4. Estos años típicos en formato .csv, como se describe en la sección 4.3, fueron obtenidos del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos de América (NREL por sus siglas en inglés). Pero estos años típicos obtenidos del NREL no estaban disponibles con todos los datos requeridos por el procesador de archivos climáticos de *EnergyPlus*, por lo tanto, se procedió a completar dichos TMY. Una vez elaborados los años típicos con todos los datos requeridos por el procesador de archivos climáticos de *EnergyPlus*, fueron copiados a uno de los archivos .csv que ya están en la base de datos del *DesignBuilder* que se utilizó como plantilla y utilizando el procesador de archivos climáticos se procedió a convertir al formato .epw. Estos archivos con datos propios para el territorio dominicano son un aporte de esta tesis.

#### 9.3.1.2. Año meteorológico típico (TMY)

Un conjunto de datos de año meteorológico típico (TMY) proporciona a los diseñadores y otros usuarios un conjunto de datos anuales de tamaño razonable que contiene valores meteorológicos por hora que tipifican las condiciones en un lugar específico durante un período de tiempo más largo, como 10, 20 o 30 años. Los conjuntos de datos TMY son ampliamente utilizados por diseñadores de edificios y otros para modelar sistemas de conversión de energía renovable. Aunque no está diseñado para proporcionar extremos meteorológicos, los datos de TMY tienen variaciones diurnas y estacionales naturales y representan un año de condiciones climáticas típicas para una ubicación. El conjunto de datos TMY se compone de 12 meses meteorológicos típicos (enero a diciembre) que se concatenan esencialmente sin modificación para formar un solo año con un registro de datos completo en serie para mediciones primarias. Estos conjuntos de datos mensuales contienen mediciones meteorológicas de series temporales reales y valores solares modelados, aunque algunos registros por hora pueden contener datos rellenados o interpolados para períodos en los que faltan observaciones originales del archivo de datos. (162) (163) (164)

### 9.3.2. Datos del Sitio

La opción "Plantilla de Sitio" es una de las diferentes opciones que se encuentran en la pestaña "Datos del Sitio" de la etiqueta "Datos del Modelo" como muestra la figura siguiente.

Figura 78. Opciones de "Datos del Modelo" en *DesignBuilder*.

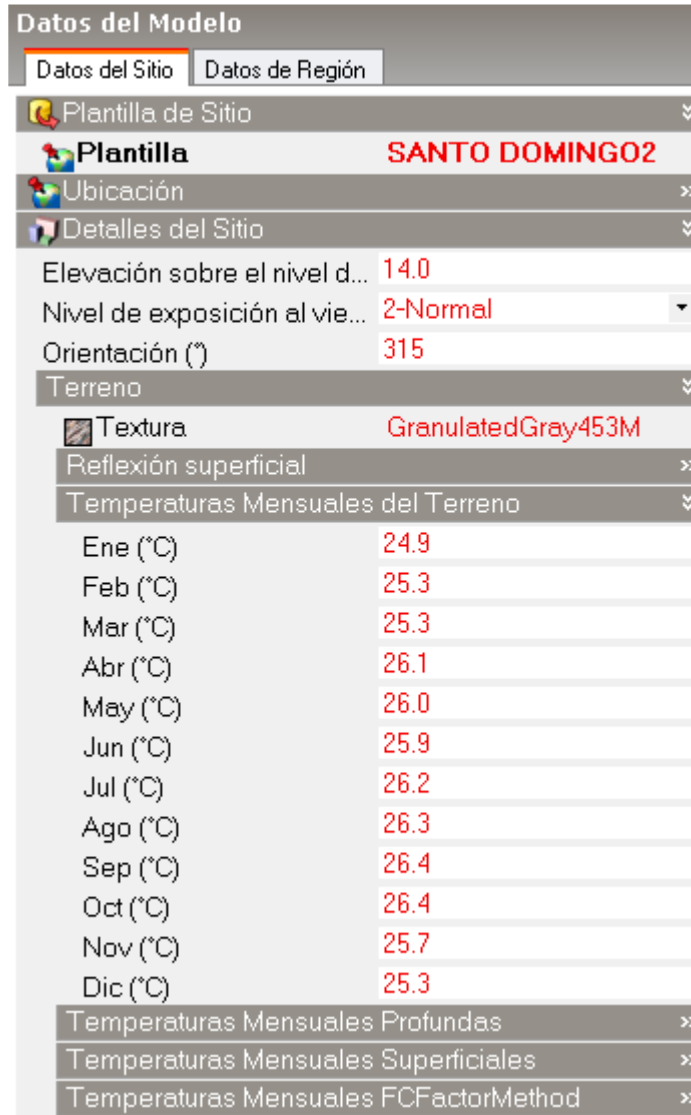


La mayoría de los valores requeridos por estas diferentes opciones deben ser rellenados con los archivos climáticos descritos en la sección anterior, unos valores se rellenan automáticamente con los datos del archivo climático de la zona elegida, pero otros deben de rellenados de forma manual como por ejemplo los datos de "Terreno". Aquí se explica el relleno de los valores correspondientes a la opción de "Terreno".

La opción "Terreno" se encuentra dentro de las opciones de "Detalles del Sitio" como se muestra en la figura siguiente. Los datos de "Terreno" se llenan con valores propios de la localidad que se va a simular, la opción "Temperaturas Mensuales del Terreno" que según el manual de *DesignBuilder* p. 160 estas son las temperaturas promedio del terreno para cada mes del año que se aplican a la superficie exterior de todos los cerramientos adyacentes al terreno. Para la República Dominicana no se disponen de estos valores de temperaturas para las localidades simuladas en esta tesis. Por lo tanto, es un aporte de esta tesis la actualización y puestos a disposición pública de estos valores con las temperaturas del terreno de las diferentes localidades simuladas. (165)



Figura 79. Opciones de "Detalles del Sitio" en "Datos del Modelo" en *DesignBuilder*.



### 9.3.3. Materiales

Para esta tesis fueron utilizados materiales y componentes de cerramientos que no están en la base de datos del *DesignBuilder*. Por lo tanto, se procedió a crear esas plantillas.

#### 9.3.3.1. Placas aislantes

La utilización de las placas de cemento y papel reciclado para aislar de la radiación solar es uno de los diseños constructivos investigados en esta tesis, es un material novedoso que no está disponible en la base de datos del *DesignBuilder*, debido a esto fue necesario crear esta plantilla de "Material", los valores son mostrados en la figura siguiente.

Figura 80. Valores de las placas aislantes creada en *DesignBuilder*.

Materiales Datos					
General	Propiedades superficiales	Cubierta vegetal	Carbono incorporado	Cambio de fase	Coste
General					
<b>Nombre</b>	<b>Plycem</b>				
Descripción	Placa cemento y material celulósico (papel)				
Fuente	Propia y del fabricante (densidad)				
Categoría	Otro				
Región	General				
Espesor de la Capa de Material					
<input type="checkbox"/> Fijar espesor					
Propiedades Térmicas					
● <b>Detalladas</b>					
Propiedades de masa térmica					
Conductividad (W/m-K)	0.3200				
Calor específico (J/kg-K)	1041.15				
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1150.00				

### 9.3.3.2. Suelos y valores de vegetación para cubierta verde

También fueron creados materiales de diferentes tipos de suelos y capa de vegetación que fueron analizados y determinadas sus propiedades para ser utilizados en simulación con cubierta verde. Dichos valores fueron obtenidos de un estudio de campo realizado en Estados Unidos de América, luego fueron utilizados para validar el modelo de techo verde en un *software* de simulación energética, posteriormente utilizados en diferentes zonas climáticas (166). En la figura siguiente se muestran los valores para suelo en primavera.

Figura 81. Valores de suelos en primavera creada en *DesignBuilder*.

Materiales Datos					
General	Propiedades superficiales	Cubierta vegetal	Carbono incorporado	Cambio de fase	Coste
General					
<b>Nombre</b>	<b>Suelo Para Cubierta Verde-Primavera, Humedad 0.50 m3 m-3</b>				
Descripción	Para simular capa de suelo en cubierta verde con valores de propiedad				
Fuente	Artículo development and applicatio				
Categoría	Arenas, piedras y tierras				
Región	General				
Espesor de la Capa de Material					
<input type="checkbox"/> Fijar espesor					
Propiedades Térmicas					
● <b>Detalladas</b>					
Propiedades de masa térmica					
Conductividad (W/m-K)	0.6660				
Calor específico (J/kg-K)	3715.00				
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	845.00				

En la figura siguiente se muestran los valores para suelo en verano.

Figura 82. Valores de suelos en verano creada en *DesignBuilder*.

**Materiales Datos**

General | Propiedades superficiales | Cubierta vegetal | Carbono incorporado | Cambio de fase | Coste

General

**Nombre** **Suelo Para Cubierta Verde-Verano, Humedad 0.24 m3 m-3**

Descripción Para simular capa de suelo en cubierta verde con valores de propiedad

Fuente Artículo development and applicatio

Categoría Arenas, piedras y tierras

Región General

Espesor de la Capa de Material

Fijar espesor

Propiedades Térmicas

**Detalladas**

Propiedades de masa térmica

Conductividad (W/m-K)	0.3720
Calor específico (J/kg-K)	3238.00
Densidad (kg/m³)	585.00

En la figura siguiente se muestran los valores para suelo en invierno.

Figura 83. Valores de suelos en invierno creada en *DesignBuilder*.

**Materiales Datos**

General | Propiedades superficiales | Cubierta vegetal | Carbono incorporado | Cambio de fase | Coste

General

**Nombre** **Suelo Para Cubierta Verde-Invierno, Humedad 0.48 m3 m-3**

Descripción Para simular capa de suelo en cubierta verde con valores de propiedad

Fuente Artículo development and applicatio

Categoría Arenas, piedras y tierras

Región General

Espesor de la Capa de Material

Fijar espesor

Propiedades Térmicas

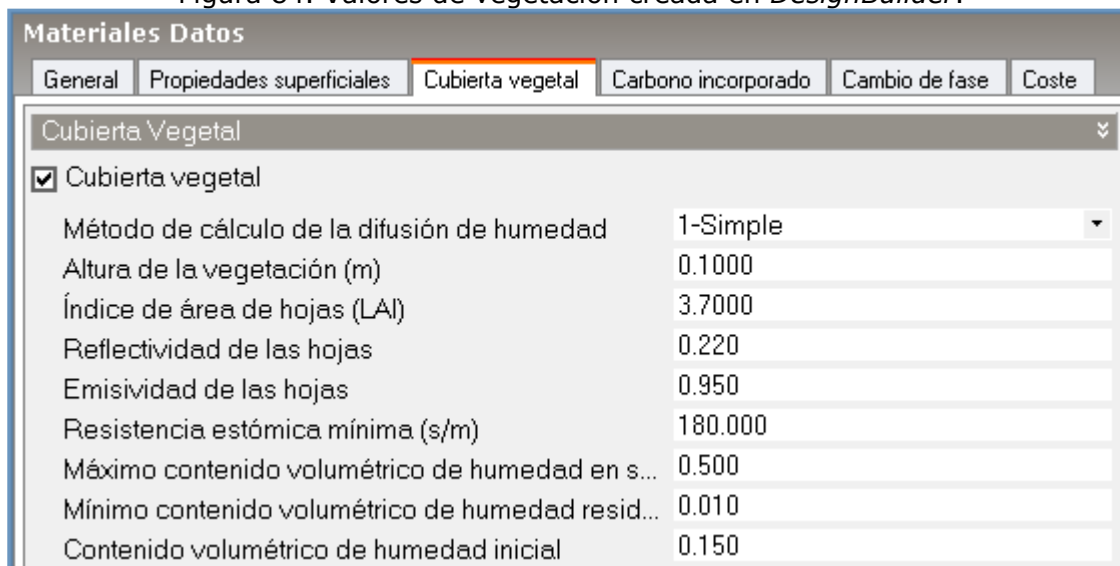
**Detalladas**

Propiedades de masa térmica

Conductividad (W/m-K)	0.6440
Calor específico (J/kg-K)	3678.00
Densidad (kg/m³)	825.00

En la figura siguiente se muestran los valores del estudio de campo de vegetación utilizada (*sedum*) en simulación con techo verde.

Figura 84. Valores de vegetación creada en *DesignBuilder*.



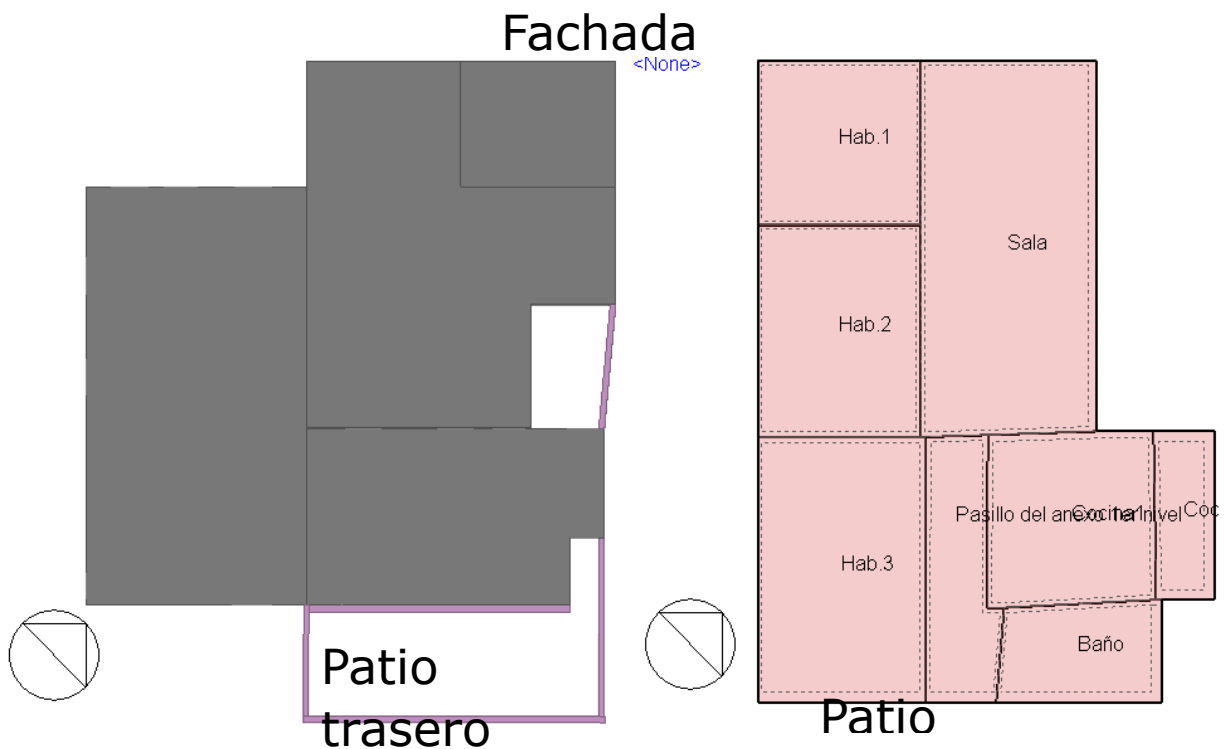
#### 9.4. Modelos simulados: aplicación de la metodología

El primer modelo preparado fue el que representa las condiciones de la vivienda analizada en los ensayos de campo, es decir, el modelo diseñado para ser comparado (a manera de validación) con los resultados de los ensayos *in situ*. Una vez establecida la correspondencia (a manera de validación) el modelo fue utilizado para comparar las diferentes configuraciones constructivas tomando en cuenta las zonas climáticas establecidas. Finalmente elegir la mejor configuración para cada zona climática. A continuación, se presentan las diferentes configuraciones simuladas.

Con el modelo validado se realizaron las siguientes simulaciones:

- Con diferentes orientaciones  
La vivienda de los ensayos de campo tiene su fachada principal orientada al noroeste (  $315^\circ$ ) (ver figura siguiente). Se realizaron simulaciones con ocho orientaciones: norte ( $0^\circ$ ,  $360^\circ$ ), noreste ( $45^\circ$ ), este ( $90^\circ$ ), sureste ( $135^\circ$ ), sur ( $180^\circ$ ), suroeste ( $225^\circ$ ), oeste ( $270^\circ$ ) y noroeste ( $315^\circ$ ).

Figura 85. Orientación de la vivienda ensayada y simulada en *DesignBuilder*.

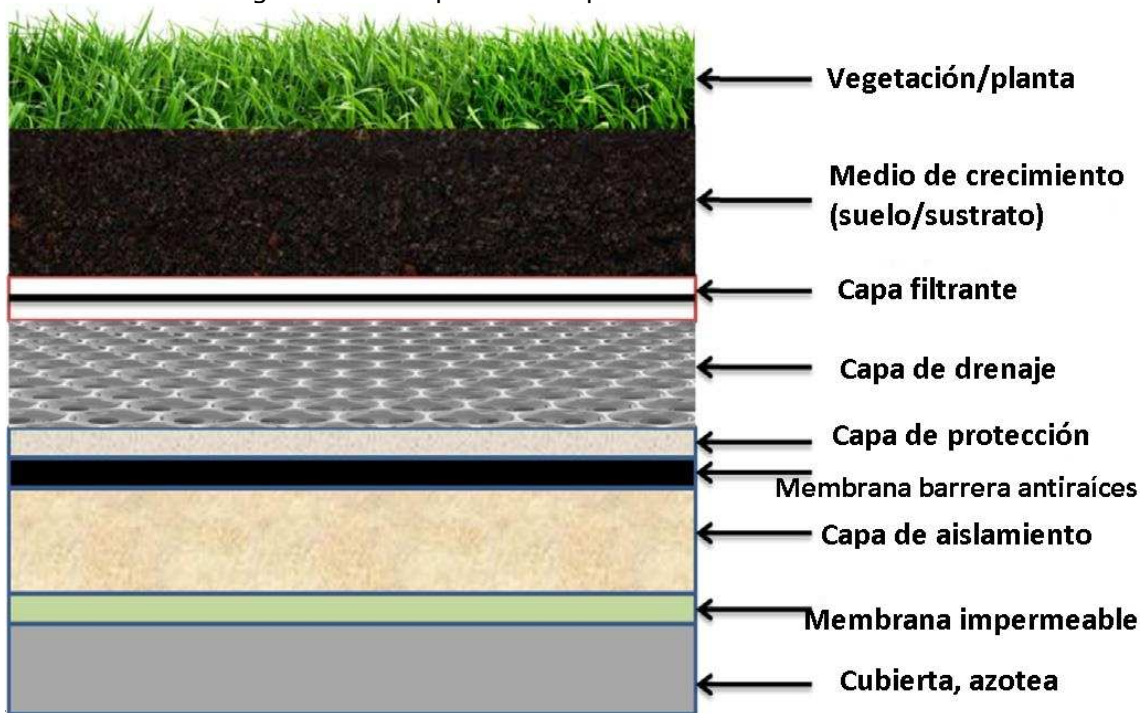


- Con y sin muro de cierre del patio.
- Casa pareada y no pareada.
- Con infiltraciones y sin infiltraciones de aire
- Con las placas aislantes colocadas solo en los muros en diferentes posiciones: colocadas por cara interior, por cara exterior y por ambas caras (exterior-interior).
- Con las placas aislantes más cámara de aire de 5 cm colocadas solo en los muros, en diferentes posiciones. El aire utilizado fue con el siguiente valor de resistencia térmica  $0,239\ 9\ (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ .
- Con las placas aislantes en los muros y en la cubierta.
- Con apertura de ventanas en las horas en que las temperaturas exteriores sean inferiores a las temperaturas interiores para aprovechamiento de la ventilación natural como diseño para aumentar la eficiencia energética en la edificación (31) (32) (33) (34).
- Con equipo de refrigeración seleccionando  $26\ ^\circ\text{C}$  como temperatura de bulbo seco de consigna interior, la cual está dentro del rango de confort incluso en países con climas tropicales, cálidos y húmedos (19) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27). España también utiliza  $26\ ^\circ\text{C}$  como límite superior para verano según el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) (20).
- Con equipo de refrigeración combinado con apertura de ventanas
- Con grava y poliestireno en la cubierta.
- Con cubierta verde en el techo. Los techos verdes, también llamados como cubierta verde, cubierta vegetal, techo vegetal, techos frescos, techos ecológicos, jardín en la azotea o techos vivos (167).

Los techos verdes son básicamente los techos plantados con diferentes tipos de vegetación/plantas sobre un medio de crecimiento (sustrato) (167) (168).

Como se muestra en la figura siguiente un techo verde generalmente consta de varios componentes, que incluyen vegetación, sustrato, capa filtrante, material de drenaje, aislamiento, barrera de raíces y membranas impermeables. La selección óptima de cada componente es muy importante para obtener los mejores resultados de los techos verdes. Cada componente es igualmente importante y juega un papel muy importante para el mejor rendimiento del techo verde en un área (169) (167) (168).

Figura 86. Componentes típicos de un techo verde.



Investigaciones sobre los techos verdes muestran numerosos beneficios sociales, ambientales y económicos. Beneficios tales como, el manejo de las aguas pluviales, la reducción de la isla de calor urbano, el aumento de las plantas urbanas, hábitat de la vida silvestre y la vida útil del techo, mejorar la calidad del aire y el agua y la calidad de vida, disminución de costos de consumo de energía en la edificación, disminución de la contaminación acústica, crea actividades recreativas, aumento de las áreas verdes y valor estético en entornos urbanos. (170) (171) (172) (169) (167) (168). Los techos verdes han sido contemplados en el módulo *EnergyPlus*, utilizado por el *software* de simulación *DesignBuilder*, para evaluar sus beneficios, comportamientos térmicos y energéticos de edificios (173).

Los techos verdes se clasifican en intensivos, semiintensivos, extensivos de un solo curso y extensivos de múltiples cursos. Los techos verdes intensivos se clasifican en función del grosor del sustrato (>30,48 cm). Una amplia variedad de plantas/vegetaciones, paisajes similares a nivel del suelo, alta capacidad de retención de agua, altos costos de capital y mantenimiento y mayor peso. Debido a la gran profundidad del suelo, tiene

más capacidad de retención de agua y la selección de plantas puede ser más diversa como pequeños árboles y arbustos. Esto también requiere más consideración sobre la capacidad de la estructura del edificio para soportar un gran peso. Por lo tanto, este tipo de techos requiere un alto mantenimiento en forma de riego, deshierbe y fertilidad. Techos verdes con 15,24 cm–30,48 cm de espesor de sustrato, denominados techos verdes semiintensivos. Esos contienen un grosor de sustrato considerado moderado y generalmente contienen plantas pequeñas, arbustos-pequeños y hierba. Estos techos requieren un mantenimiento regular y altos costos de capital para un mejor rendimiento. los techos extensivos de un solo curso son los techos con un grosor de sustrato de 7,62 cm a 10,16 cm. En los techos extensivos de un solo curso, la mayoría usan *sedum* como capa de vegetación y generalmente no requieren riego. Se requirieron pocos costos de capital y mantenimiento en comparación con todos los demás techos. Estos techos suelen ser muy ligeros y útiles donde el peso del edificio restringe. Mientras que los techos extensivos de varios o múltiples cursos constan de 10,16 cm a 15,24 cm de espesor de sustrato. Este tipo de techo generalmente es liviano y se usa principalmente en los EE. UU. De los cuatro tipos, los techos extensivos de uno o varios cursos son más comunes en todo el mundo debido a su menor peso, requerimiento de riego casi nulo, menos costos de capital y mantenimiento. (169) (167) (168)

La cubierta utilizada para simulación en esta tesis está compuesta de la siguiente manera:

- Una capa vegetal de 10 cm de altura, *sedum*, con las especificaciones detalladas en el apartado 9.3.3.2.
- Una capa de sustrato/suelo de 10 cm de espesor, con las especificaciones detalladas en el apartado 9.3.3.2.
- Una capa filtrante de polipropileno 0,5 cm de espesor, con los siguientes parámetros: conductividad 0,22 W/(m·K), calor específico 1800 J/(kg·K) y densidad 910 kg/m<sup>3</sup>.
- Una capa drenante de polietileno de alta densidad 2,5 cm de espesor, con los siguientes parámetros: conductividad 0,5 W/(m·K), calor específico 1800 J/(kg·K) y densidad 980 kg/m<sup>3</sup>.
- Una capa de protección de polipropileno 0,5 cm de espesor, con los siguientes parámetros: conductividad 0,22 W/(m·K), calor específico 1800 J/(kg·K) y densidad 910 kg/m<sup>3</sup>.
- Capa de aislamiento de EPS poliestireno expandido 0,029 W/(m·K), 5 cm de espesor, con los siguientes parámetros: conductividad 0,029 W/(m·K), calor específico 1000 J/(kg·K) y densidad 30 kg/m<sup>3</sup>.
- Una capa impermeabilizante de cloruro de polivinilo (PVC) + 40 % plastificante 0,2 cm de espesor, con los siguientes parámetros: conductividad 0,14 W/(m·K), calor específico 1000 J/(kg·K) y densidad 1200 kg/m<sup>3</sup>.

## 9.5. Resultados de los modelos simulados

### 9.5.1. Correspondencia entre el modelo ensayado y simulado

Los ensayos de campo explicados en el capítulo anterior a posteriori se simularon con *DesignBuilder*. Para establecer la correspondencia entre el modelo con los ensayos de campo, además de la configuración general antes desarrollada, la vivienda fue simulada con los siguientes parámetros particulares: desocupada, sin iluminación, sin equipos eléctricos ni electrónicos, nivel de estanqueidad al aire muy pobre, opción de ventilación natural calculada y solo la puerta y ventana de la habitación ensayada fueron cerradas para estar acorde al ensayo de campo.

#### 9.5.1.1. Caso de pared sin placas térmicamente aislantes como es práctica común

La evolución de la temperatura superficial tanto interior como exterior del muro de la habitación ensayada, se muestran en la tabla siguiente. Esta simulación en lo sucesivo se denominará simulación referente al ensayo E1 (SRE1).

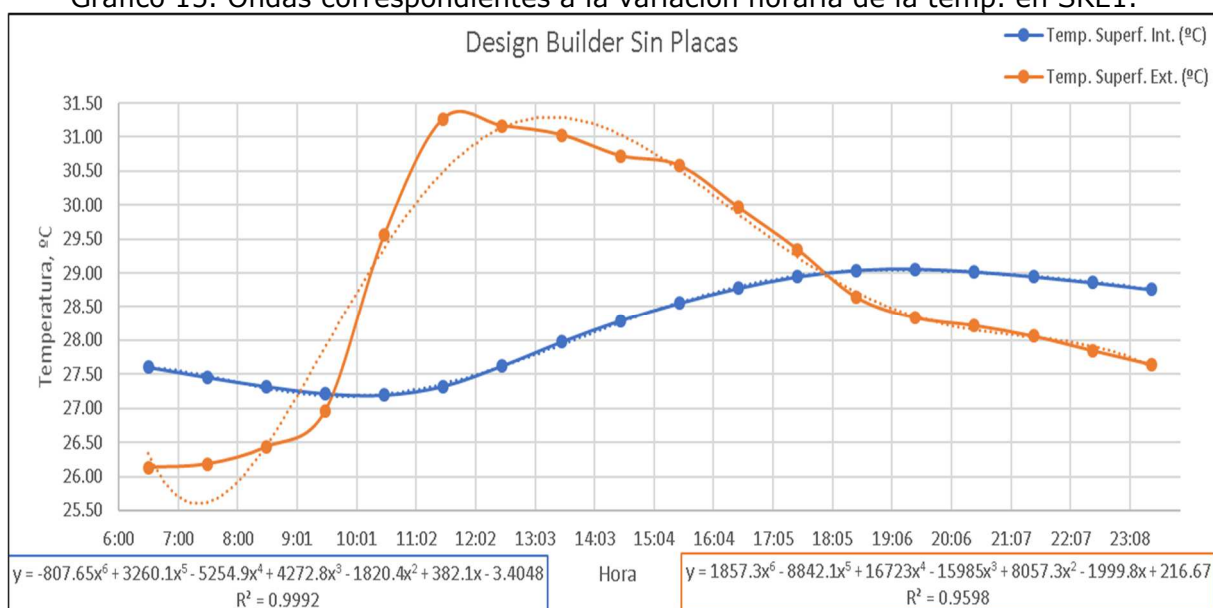
Tabla 57. Evolución horaria de la temperatura superficial interior/exterior según SRE1.

<b>Hora</b>	<b>Temp. Superf. Int. (°C)</b>	<b>Temp. Superf. Ext. (°C)</b>
<b>6:30</b>	27,60	26,13
<b>7:30</b>	27,45	26,18
<b>8:30</b>	27,32	26,43
<b>9:30</b>	27,21	26,96
<b>10:30</b>	27,19	29,56
<b>11:30</b>	27,32	31,27
<b>12:30</b>	27,62	31,16
<b>13:30</b>	27,97	31,03
<b>14:30</b>	28,29	30,72
<b>15:30</b>	28,55	30,58
<b>16:30</b>	28,77	29,97
<b>17:30</b>	28,94	29,35
<b>18:30</b>	29,04	28,64
<b>19:30</b>	29,06	28,33
<b>20:30</b>	29,02	28,22
<b>21:30</b>	28,95	28,06
<b>22:30</b>	28,86	27,85
<b>23:30</b>	28,76	27,64
<b>0:30</b>	28,64	27,46
<b>1:30</b>	28,51	27,27
<b>2:30</b>	28,37	27,08
<b>3:30</b>	28,22	26,98
<b>4:30</b>	28,08	27,00
<b>5:30</b>	27,94	27,12
<b>6:30</b>	27,82	27,23
<b>Valores promedios</b>	28,22	28,78



En el gráfico siguiente se observan las ondas correspondientes a la variación de la temperatura tanto de la cara exterior como la interior del paramento correspondiente a la simulación SRE1.

Gráfico 15. Ondas correspondientes a la variación horaria de la temp. en SRE1.



Para una mejor comparación entre la simulación SRE1 y el ensayo de campo E1, en la tabla siguiente se recogen los resultados tanto de la SRE1 como del E1.

Tabla 58. Evolución horaria de la temperatura superficial interior/exterior, SRE1 y E1.

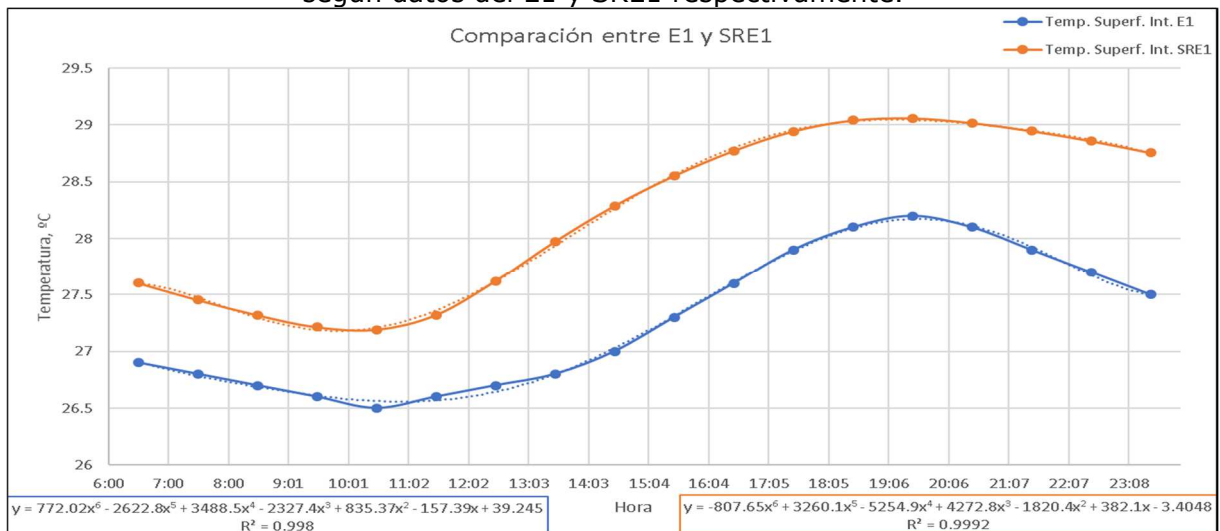
Hora	SRE1		E1	
	Temp. Superf. Int. (°C)	Temp. Superf. Ext. (°C)	Temp. Superf. Int. (°C)	Temp. Superf. Ext. (°C)
6:30	27,60	26,13	26,9	25,8
7:30	27,45	26,18	26,8	25,9
8:30	27,32	26,43	26,7	26,3
9:30	27,21	26,96	26,6	26,9
10:30	27,19	29,56	26,5	28,5
11:30	27,32	31,27	26,6	30,5
12:30	27,62	31,16	26,7	30,1
13:30	27,97	31,03	26,8	29,9
14:30	28,29	30,72	27	29,6
15:30	28,55	30,58	27,3	29,5
16:30	28,77	29,97	27,6	29,1
17:30	28,94	29,35	27,9	28,7
18:30	29,04	28,64	28,1	28,2
19:30	29,06	28,33	28,2	27,9
20:30	29,02	28,22	28,1	27,7
21:30	28,95	28,06	27,9	27,6
22:30	28,86	27,85	27,7	27,4
23:30	28,76	27,64	27,5	27,1
<b>Valores promedios</b>	28,22	28,78	27,27	28,15

De la tabla anterior se extraen las siguientes conclusiones:

- Comparación de la variación de temperatura en la cara exterior del muro
  - Las temperaturas máximas (sombreado rojo) en la cara exterior se registran tanto en E1 como en SRE1 a las 11:30, difiriendo ambas temperaturas en 0,77 °C.
  - Las temperaturas mínimas (sombreado azul) en la cara exterior se registran tanto en E1 como en SRE1 a las 6:30 difiriendo ambas en 0,33 °C.
  - El valor promedio de la temperatura de la cara exterior en E1 es de 28,15 °C y en SRE1 de 28,78 °C, difiriendo ambas en 0,63 °C.
- Comparación de la variación de temperatura en la cara interior del muro
  - La temperatura superficial interior mínima (sombreado azul) tanto en E1 como SRE1 se produce a las 10:30 con 0,69 °C de diferencia.
  - Las temperaturas máximas (sombreado rojo) se registran las 19:30 con solo 0,86 °C de diferencia, los valores promedios muestran 0,95 °C de diferencia.
- Desfase y amortiguamiento entre la onda de temperatura en la cara exterior y su correspondiente en la cara interior
  - El desfase, tanto en el ensayo E1 como en la simulación SRE1 , es de 8 horas.
  - El amortiguamiento y c. e. t. toma el valor de 0,36 en E1 y en SRE1, dando como resultado el mismo factor de amortiguamiento de 64 %.

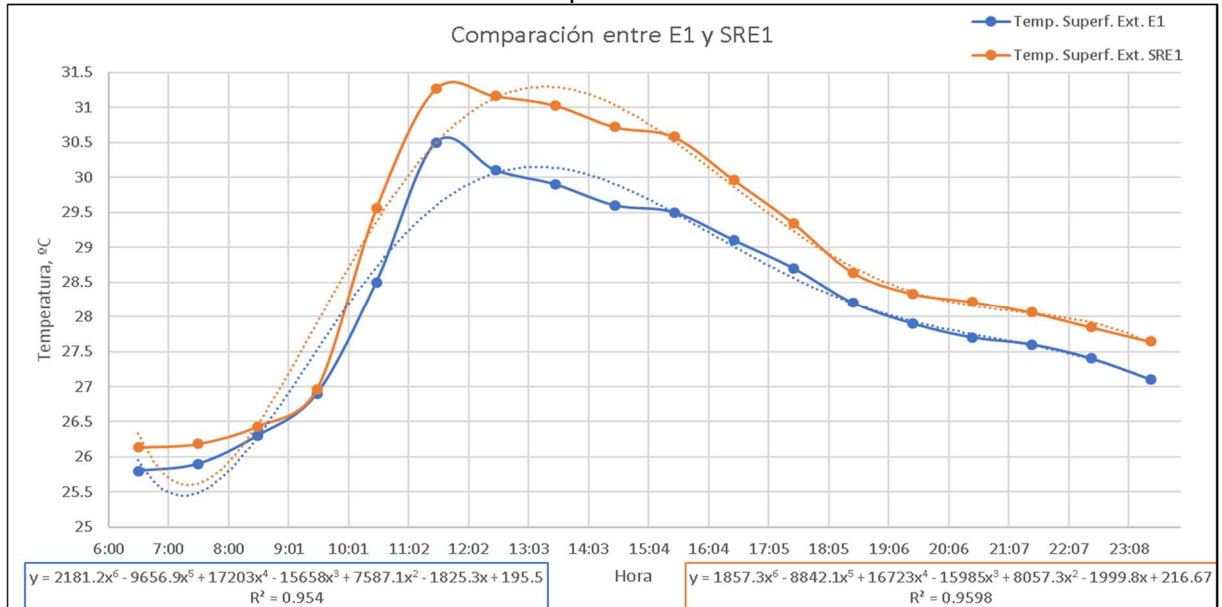
En el gráfico siguiente se observa la evolución de la temperatura superficial de la cara interior conforme a los datos del E1 y la citada evolución conforme a los datos del SRE1. Nótese la similitud.

Gráfico 16. Evolución horaria de la temperatura superficial de la cara interior del muro según datos del E1 y SRE1 respectivamente.



El gráfico siguiente proporciona la misma información que el gráfico anterior pero referida a la evolución de la temperatura de la cara exterior del muro conforme a los datos de E1 y SRE1 respectivamente.

Gráfico 17. Evolución horaria de la temperatura superficial exterior según datos de E1 y SRE1 respectivamente.



9.5.1.2. Pared con placas térmicamente aislantes en su cara interior

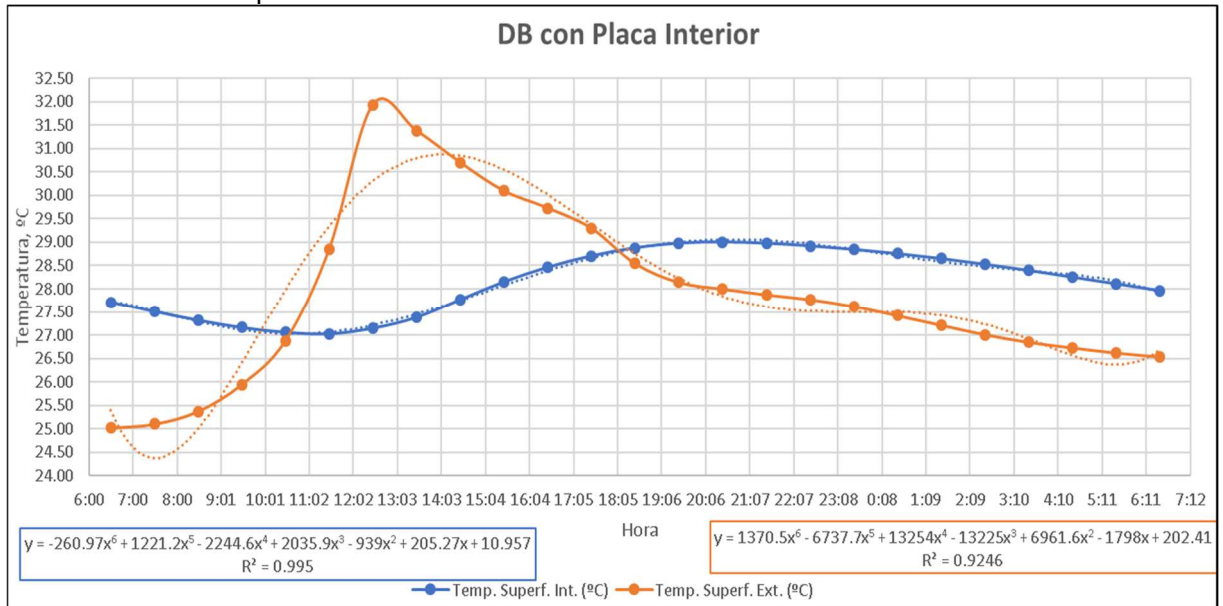
Los valores de la evolución de la temperatura superficial tanto en la cara interior como en la exterior del muro de la habitación, obtenidos mediante simulación, se muestran en la tabla y gráfico siguiente. Esta simulación, en lo sucesivo, se denominará como simulación referente al ensayo E2 (SRE2).

Tabla 59. Evolución horaria de la temperatura tanto en la cara interior como exterior en SRE2.

<b>Hora</b>	<b>Temp. Superf. Int. (°C)</b>	<b>Temp. Superf. Ext. (°C)</b>
<b>6:30</b>	27,71	25,02
<b>7:30</b>	27,51	25,10
<b>8:30</b>	27,32	25,37
<b>9:30</b>	27,16	25,95
<b>10:30</b>	27,06	26,88
<b>11:30</b>	27,03	28,85
<b>12:30</b>	27,15	31,93
<b>13:30</b>	27,38	31,38
<b>14:30</b>	27,77	30,70
<b>15:30</b>	28,15	30,10
<b>16:30</b>	28,46	29,73
<b>17:30</b>	28,71	29,30
<b>18:30</b>	28,88	28,54
<b>19:30</b>	28,98	28,14
<b>20:30</b>	29,00	27,99
<b>21:30</b>	28,98	27,87
<b>22:30</b>	28,92	27,77
<b>23:30</b>	28,85	27,62
<b>0:30</b>	28,76	27,42
<b>1:30</b>	28,65	27,21
<b>2:30</b>	28,53	27,01
<b>3:30</b>	28,40	26,85
<b>4:30</b>	28,25	26,73
<b>5:30</b>	28,11	26,62
<b>6:30</b>	27,97	26,54
<b>Valores promedios</b>	28,15	27,87

El gráfico siguiente recoge las formas de ondas correspondientes a la variación horaria de las temperaturas superficiales interior y exterior en SRE2.

Gráfico 18. Ondas de la evolución horaria de las temperaturas superficiales correspondientes a la cara exterior e interior del muro en SRE2.



Para una mejor comparación entre los valores obtenidos en SRE2 y E2, en la tabla siguiente se recogen los valores obtenidos en ambos casos.

Tabla 60. Evolución horaria de las temperaturas obtenidas en SRE2 y E2.

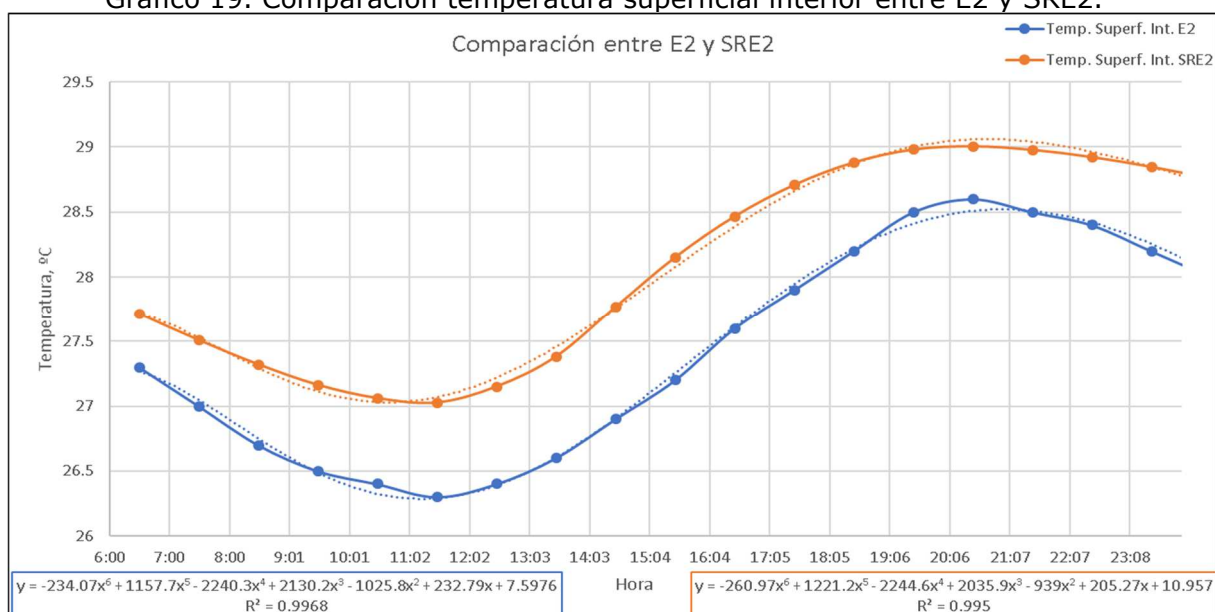
Hora	SRE2		E2	
	Temp. Superf. Int. (°C)	Temp. Superf. Ext. (°C)	Temp. Superf. Int. (°C)	Temp. Superf. Ext. (°C)
6:30	27,71	25,02	27,3	24,1
7:30	27,51	25,10	27	24,7
8:30	27,32	25,37	26,7	25,3
9:30	27,16	25,95	26,5	25,8
10:30	27,06	26,88	26,4	26,5
11:30	27,03	28,85	26,3	28,7
12:30	27,15	31,93	26,4	31,5
13:30	27,38	31,38	26,6	31
14:30	27,77	30,70	26,9	30,4
15:30	28,15	30,10	27,2	30,1
16:30	28,46	29,73	27,6	29,8
17:30	28,71	29,30	27,9	29,5
18:30	28,88	28,54	28,2	28,7
19:30	28,98	28,14	28,5	28,1
20:30	29,00	27,99	28,6	27,6
21:30	28,98	27,87	28,5	27,2
22:30	28,92	27,77	28,4	26,8
23:30	28,85	27,62	28,2	26,3
0:30	28,76	27,42	28	26
1:30	28,65	27,21	27,8	25,7
2:30	28,53	27,01	27,6	25,5
3:30	28,40	26,85	27,4	25,4
4:30	28,25	26,73	27,2	25,3
5:30	28,11	26,62	27,1	25,2
6:30	27,97	26,54	27	25
<b>Valores promedios</b>	28,15	27,87	27,41	27,21

De la tabla anterior se extraen las siguientes conclusiones:

- Comparación de la variación de temperatura en la cara exterior del muro
  - Las temperaturas máximas (sombreado rojo) en la cara exterior se registran tanto en E2 como en SRE2 a las 12:30, difiriendo ambas temperaturas en 0,43 °C .
  - Las temperaturas mínimas (sombreado azul) en la cara exterior se registran tanto en E2 como en SRE2 a las 6:30 difiriendo ambas en 0,92 °C .
  - El valor promedio de la temperatura de la cara exterior en E2 es de 27,87 °C y en SRE2 de 27,21 °C, lo que supone una diferencia de 0,66 °C.
- Comparación de la variación de temperatura en la cara interior del muro
  - La temperatura superficial interior mínima (sombreado azul) tanto en E2 como en SRE2 se produce a las 11:30 con 0,73 °C de diferencia.
  - Las temperaturas máximas (sombreado rojo) se registran a las 20:30 con solo 0,40 °C de diferencia, los valores promedios se diferencian en 0,73 °C.
- Desfase y amortiguamiento entre la onda de temperatura en la cara exterior y su correspondiente en la cara interior
  - El desfase, tanto en el ensayo E2 como en la simulación SRE2 , es de 8 horas.
  - El amortiguamiento y c. e. t. se diferencian en un 2 %, con 0,31 para el E2 y 0,29 para SRE2, dando como resultado un factor de amortiguamiento de 69 % para E2 y 71 % para SRE2.

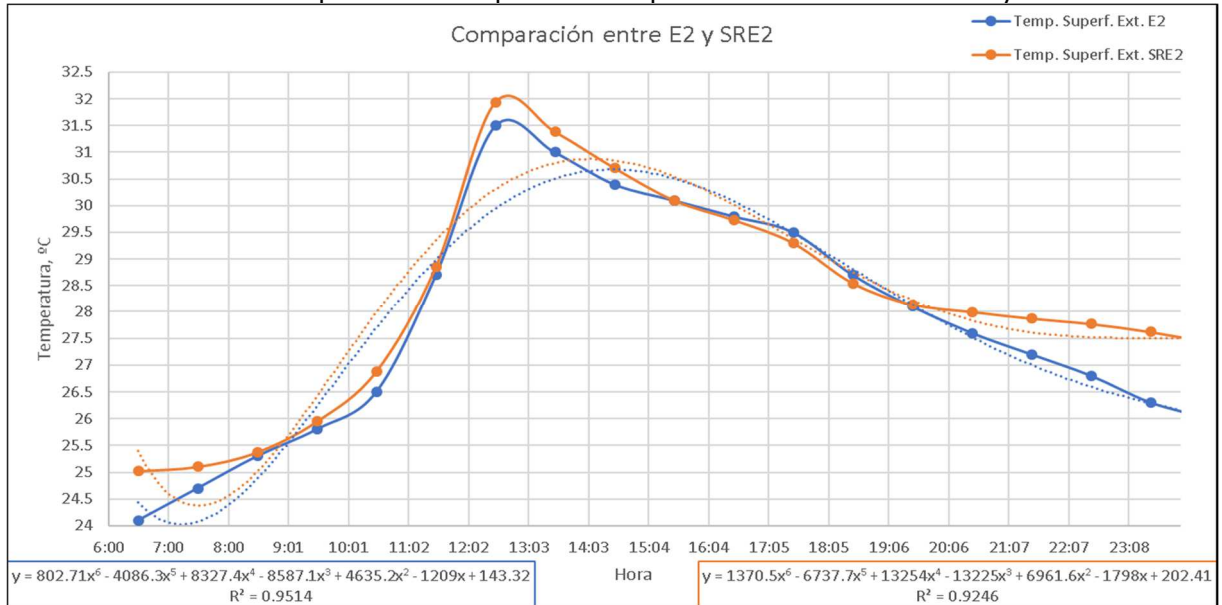
En el gráfico siguiente se representan la variación de la temperatura superficial interior correspondiente a E2 y SRE2. Obsérvese la similitud entre ambas curvas.

Gráfico 19. Comparación temperatura superficial interior entre E2 y SRE2.



En el gráfico siguiente se puede ver, con sus respectivas líneas de tendencia, la comparación del comportamiento de la temperatura superficial exterior entre E2 y SRE2, donde se puede ver que son parecidas y que siguen el mismo comportamiento.

Gráfico 20. Comparación temperatura superficial exterior entre E2 y SRE2.





9.5.1.3. Pared con placas térmicamente aislantes en su cara exterior

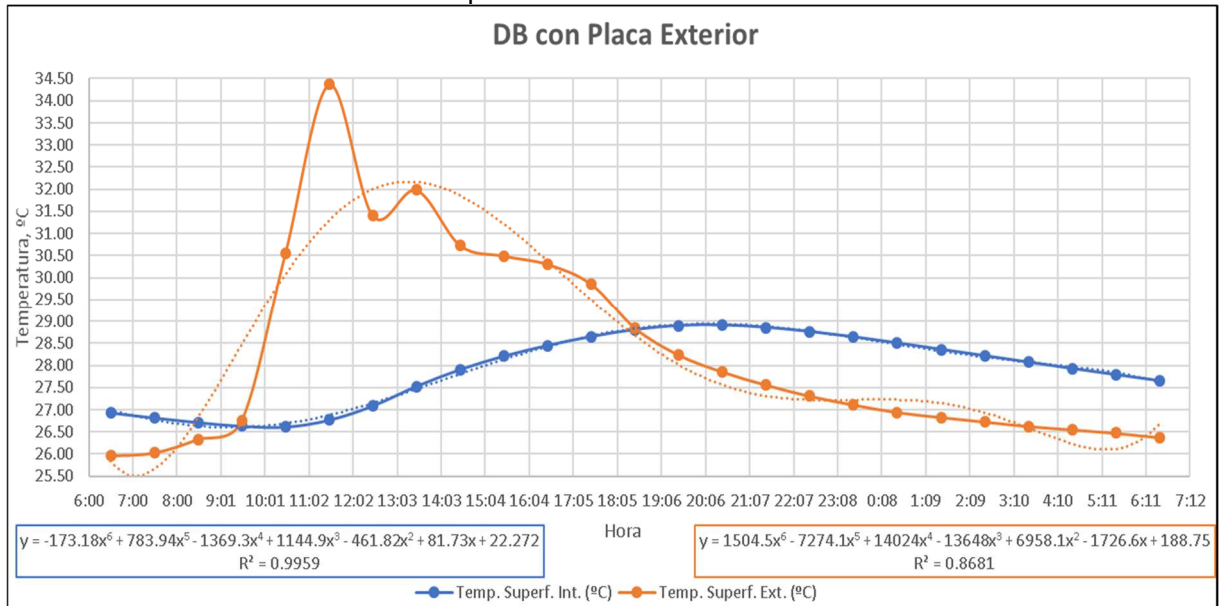
Los valores de la evolución de la temperatura superficial tanto en la cara exterior como interior del muro de la habitación objeto de análisis, obtenidos mediante simulación en el caso de pared con placas térmicamente aislantes con placas en su cara exterior, se recogen en la tabla siguiente. En lo sucesivo esta simulación será llamada simulación referente al ensayo E3 (SRE3).

Tabla 61. Evolución horaria de la temperatura superficial en SRE3.

<b>Hora</b>	<b>Temp. Superf. Int. (°C)</b>	<b>Temp. Superf. Ext. (°C)</b>
<b>6:30</b>	26,93	25,96
<b>7:30</b>	26,82	26,03
<b>8:30</b>	26,72	26,34
<b>9:30</b>	26,63	26,76
<b>10:30</b>	26,62	30,55
<b>11:30</b>	26,77	34,37
<b>12:30</b>	27,09	31,40
<b>13:30</b>	27,53	31,98
<b>14:30</b>	27,90	30,73
<b>15:30</b>	28,20	30,49
<b>16:30</b>	28,44	30,31
<b>17:30</b>	28,65	29,86
<b>18:30</b>	28,80	28,85
<b>19:30</b>	28,90	28,24
<b>20:30</b>	28,91	27,86
<b>21:30</b>	28,85	27,56
<b>22:30</b>	28,76	27,31
<b>23:30</b>	28,64	27,11
<b>0:30</b>	28,50	26,94
<b>1:30</b>	28,36	26,83
<b>2:30</b>	28,22	26,73
<b>3:30</b>	28,07	26,63
<b>4:30</b>	27,93	26,55
<b>5:30</b>	27,79	26,47
<b>6:30</b>	27,66	26,37
<b>Valores promedios</b>	27,91	28,33

En el gráfico siguiente se presenta la variación horaria de las temperaturas superficiales interior y exterior.

Gráfico 21. Ondas de temperatura correspondientes a la cara exterior e interior respectivamente en SRE3.



Para facilitar el contraste de resultados de SRE3 con los ensayos de campo 3, en la tabla siguiente se recogen ambos conjuntos de resultados.

Tabla 62. Conjuntos de valores de la temperatura horaria tanto en la cara exterior como interior del muro correspondientes a SRE3 y a E3.

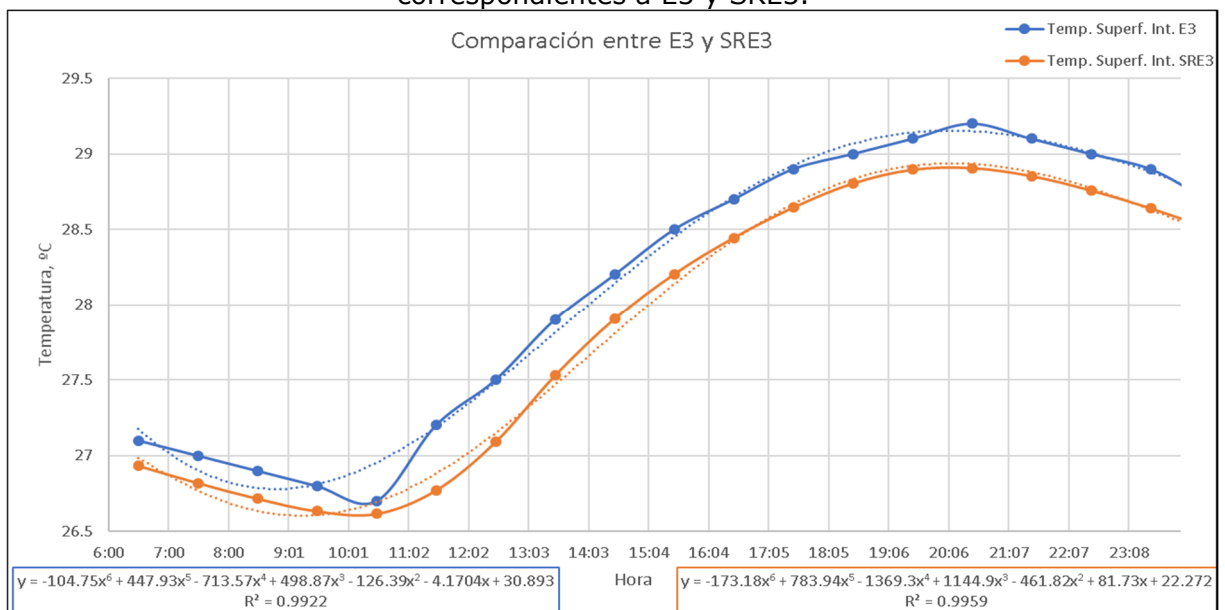
Hora	SRE3		E3	
	Temp. Superf. Int. (°C)	Temp. Superf. Ext. (°C)	Temp. Superf. Int. (°C)	Temp. Superf. Ext. (°C)
6:30	26,93	25,96	27,1	24,4
7:30	26,82	26,03	27	25,3
8:30	26,72	26,34	26,9	26,1
9:30	26,63	26,76	26,8	26,4
10:30	26,62	30,55	26,7	30,4
11:30	26,77	34,37	27,2	34
12:30	27,09	31,40	27,5	32
13:30	27,53	31,98	27,9	32,5
14:30	27,90	30,73	28,2	31,1
15:30	28,20	30,49	28,5	30,7
16:30	28,44	30,31	28,7	30,4
17:30	28,65	29,86	28,9	30
18:30	28,80	28,85	29	29,1
19:30	28,90	28,24	29,1	28,4
20:30	28,91	27,86	29,2	28,1
21:30	28,85	27,56	29,1	27,7
22:30	28,76	27,31	29	27,4
23:30	28,64	27,11	28,9	27,2
0:30	28,50	26,94	28,7	27,1
1:30	28,36	26,83	28,6	27
2:30	28,22	26,73	28,5	26,9
3:30	28,07	26,63	28,3	26,8
4:30	27,93	26,55	28,1	26,7
5:30	27,79	26,47	27,9	26,6
6:30	27,66	26,37	27,7	26,5
<b>Valores promedios</b>	27,91	28,33	28,14	28,35

De la tabla anterior se extraen las siguientes conclusiones:

- Comparación de la variación de temperatura en la cara exterior del muro
  - Las temperaturas máximas (sombreado rojo) en la cara exterior se registran tanto en E3 como en SRE3 a las 11:30, difiriendo ambas temperaturas en 0,37 °C.
  - Las temperaturas mínimas (sombreado azul) en la cara exterior se registran tanto en E3 como en SRE3 a las 6:30 difiriendo en 1,56 °C.
  - El valor promedio de la temperatura de la cara exterior en E3 es de 28,35 °C y en SRE3 de 28,33 °C, lo que supone una diferencia de 0,02 °C.
- Comparación de la variación de temperatura en la cara interior del muro
  - La temperatura superficial interior mínima (sombreado azul) tanto en E3 como en SRE3 se produce a las 10:30 con 0,08 °C de diferencia.
  - Las temperaturas máximas (sombreado rojo) se registran las 20:30 con solo 0,29 °C de diferencia y los valores promedios se diferencian en 0,23 °C.
- Desfase y amortiguamiento entre la onda de temperatura en la cara exterior y su correspondiente en la cara interior.
  - El desfase, 9 horas, es el mismo para los dos casos.
  - El amortiguamiento y c. e. t. presenta una diferencia de 0,01 (1 %), con 0,26 para el E3 y 0,27 para SRE3, dando como resultado un factor de amortiguamiento de 74 % para E3 y 73 % para SRE3.

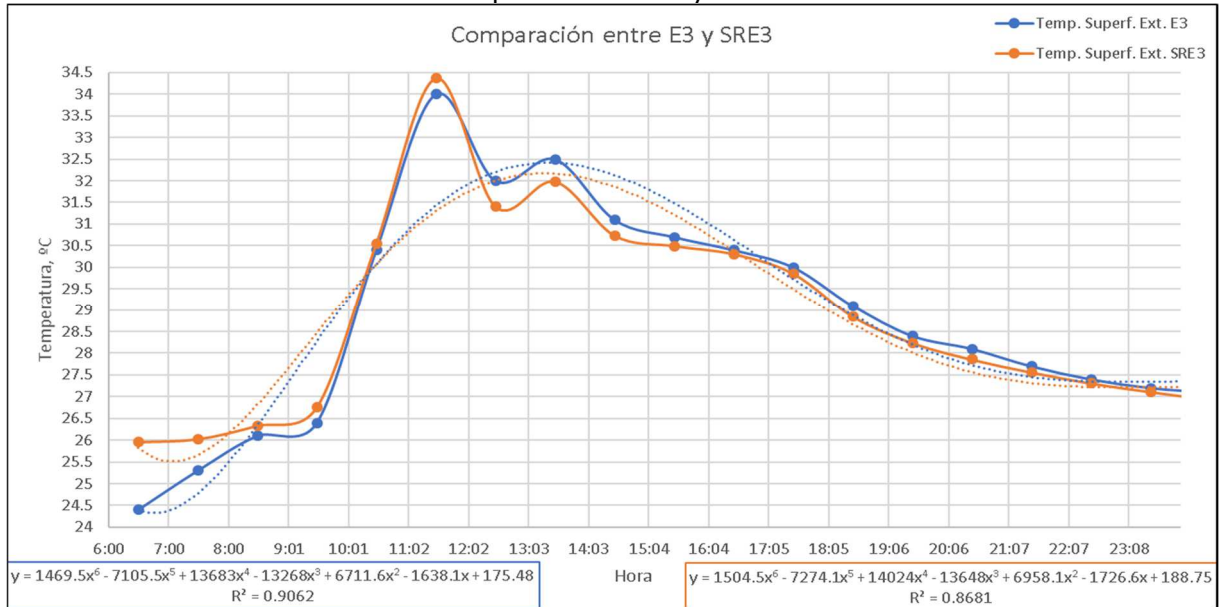
En el gráfico siguiente se representan las curvas de variación horaria de la temperatura superficial interior correspondiente a E3 y SRE3. Nótese la similitud entre ambas curvas.

Gráfico 22. Curvas de variación horaria de la temperatura superficial interior correspondientes a E3 y SRE3.



En el gráfico siguiente se representan las curvas de variación horaria de la temperatura superficial exterior correspondientes a E3 y SRE3 respectivamente. Nótese el parecido.

Gráfico 23. Curvas de variación horaria de la temperatura superficial exterior correspondientes E3 y SRE3.



9.5.1.4. Pared con placas térmicamente aislante tanto en la cara interior como exterior

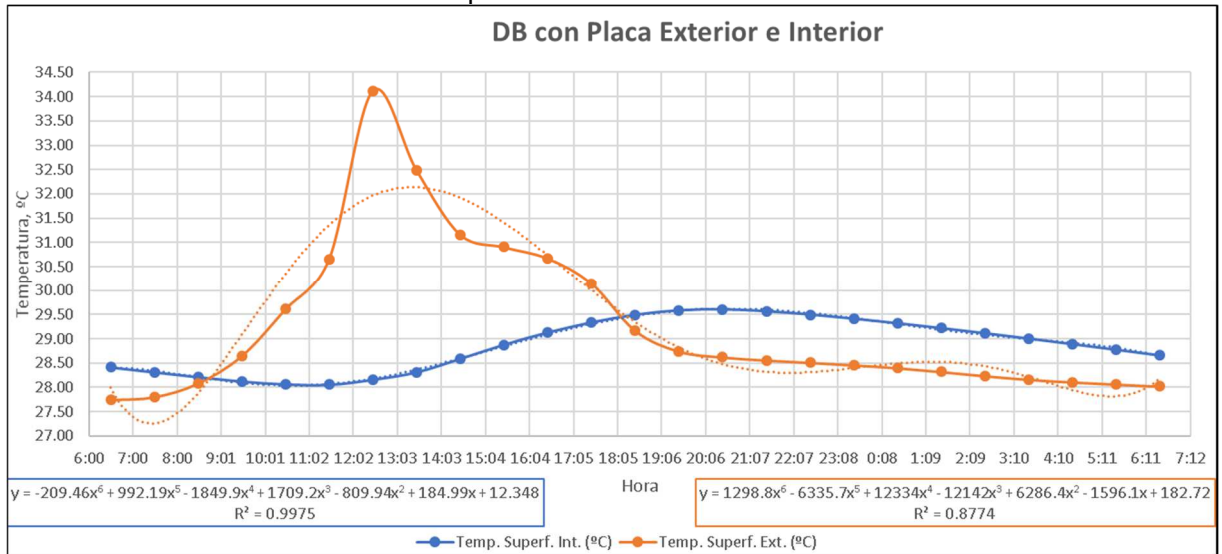
Los valores de la evolución de la temperatura superficial tanto de la cara interior como exterior del muro de la habitación objeto de estudio, obtenidos mediante simulación para el caso que nos ocupa, se recogen en la tabla siguiente. En lo sucesivo esta simulación se denominará simulación referente al ensayo E4 (SRE4).

Tabla 63. Temperatura por hora simulación SRE4.

<b>Hora</b>	<b>Temp. Superf. Int. (°C)</b>	<b>Temp. Superf. Ext. (°C)</b>
<b>6:30</b>	28,41	27,74
<b>7:30</b>	28,31	27,80
<b>8:30</b>	28,21	28,08
<b>9:30</b>	28,12	28,64
<b>10:30</b>	28,07	29,61
<b>11:30</b>	28,06	30,65
<b>12:30</b>	28,16	34,12
<b>13:30</b>	28,31	32,49
<b>14:30</b>	28,59	31,16
<b>15:30</b>	28,87	30,90
<b>16:30</b>	29,12	30,67
<b>17:30</b>	29,33	30,15
<b>18:30</b>	29,49	29,17
<b>19:30</b>	29,58	28,74
<b>20:30</b>	29,60	28,62
<b>21:30</b>	29,56	28,56
<b>22:30</b>	29,50	28,51
<b>23:30</b>	29,41	28,46
<b>0:30</b>	29,32	28,40
<b>1:30</b>	29,22	28,32
<b>2:30</b>	29,11	28,24
<b>3:30</b>	29,00	28,16
<b>4:30</b>	28,89	28,11
<b>5:30</b>	28,78	28,06
<b>6:30</b>	28,66	28,02
<b>Valores promedios</b>	28,87	29,25

El gráfico siguiente recoge las curvas de la variación horaria de las temperaturas superficiales interior y exterior correspondientes a SRE4.

Gráfico 24. Ondas de temperatura correspondientes a la cara exterior e interior respectivamente en SRE4.



Para facilitar el contraste de resultados de SRE4 con los ensayos de campo 4, en la tabla siguiente se recogen ambos conjuntos de resultados.

Tabla 64. Comparación valores de temperatura por hora entre simulación SRE4 y E4.

Hora	SRE4		E4	
	Temp. Superf. Int. (°C)	Temp. Superf. Ext. (°C)	Temp. Superf. Int. (°C)	Temp. Superf. Ext. (°C)
6:30	28,41	27,74	28,2	24,4
7:30	28,31	27,80	28,1	25,4
8:30	28,21	28,08	28	26,6
9:30	28,12	28,64	27,9	27,8
10:30	28,07	29,61	27,8	30,1
11:30	28,06	30,65	27,7	31,5
12:30	28,16	34,12	27,9	33,5
13:30	28,31	32,49	28,1	31,9
14:30	28,59	31,16	28,6	30,3
15:30	28,87	30,90	29	30
16:30	29,12	30,67	29,3	29,7
17:30	29,33	30,15	29,6	29,2
18:30	29,49	29,17	29,7	28,2
19:30	29,58	28,74	29,8	27,8
20:30	29,60	28,62	29,9	27,7
21:30	29,56	28,56	29,8	27,6
22:30	29,50	28,51	29,7	27,5
23:30	29,41	28,46	29,6	27,4
0:30	29,32	28,40	29,5	27,3
1:30	29,22	28,32	29,4	27,2
2:30	29,11	28,24	29,3	27,1
3:30	29,00	28,16	29,2	27
4:30	28,89	28,11	29,1	26,9
5:30	28,78	28,06	29	26,8
6:30	28,66	28,02	28,9	26,7
<b>Valores promedios</b>	28,87	29,25	28,92	28,22

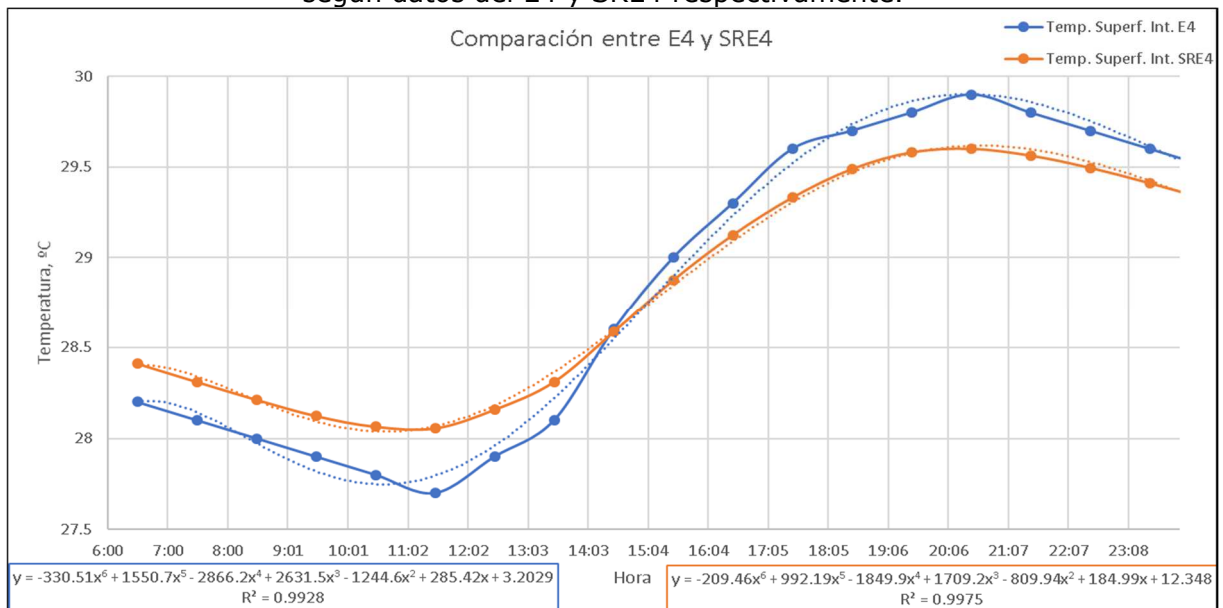


De la tabla anterior se extraen las siguientes conclusiones:

- Comparación de la variación de temperatura en la cara exterior del muro
  - Las temperaturas máximas (sombreado rojo) en la cara exterior se registran tanto en E4 como en SRE4 a las 12:30, difiriendo ambas temperaturas en 0,62 °C.
  - Las temperaturas mínimas (sombreado azul) en la cara exterior se registran tanto en E4 como en SRE4 a las 6:30 difiriendo en 3,34 °C.
  - El valor promedio de la temperatura de la cara exterior en E4 es de 28,22 °C y en SRE4 de 29,25 °C, lo que supone una diferencia de 1,03 °C.
- Comparación de la variación de temperatura en la cara interior del muro
  - La temperatura superficial interior mínima (sombreado azul) tanto en E4 como en SRE4 se produce a las 11:30 con 0,36 °C de diferencia.
  - Las temperaturas máximas (sombreado rojo) se registran a las 20:30 con solo 0,30 °C de diferencia y los valores promedios se diferencian en 0,06 °C.
- Desfase y amortiguamiento entre la onda de temperatura en la cara exterior y su correspondiente en la cara interior.
  - El desfase, 8 horas, es el mismo para los dos casos.
  - El amortiguamiento y c. e. t. es el mismo valor de 0,24 en ambos casos, dando como resultado el mismo factor de amortiguamiento de 76 %.

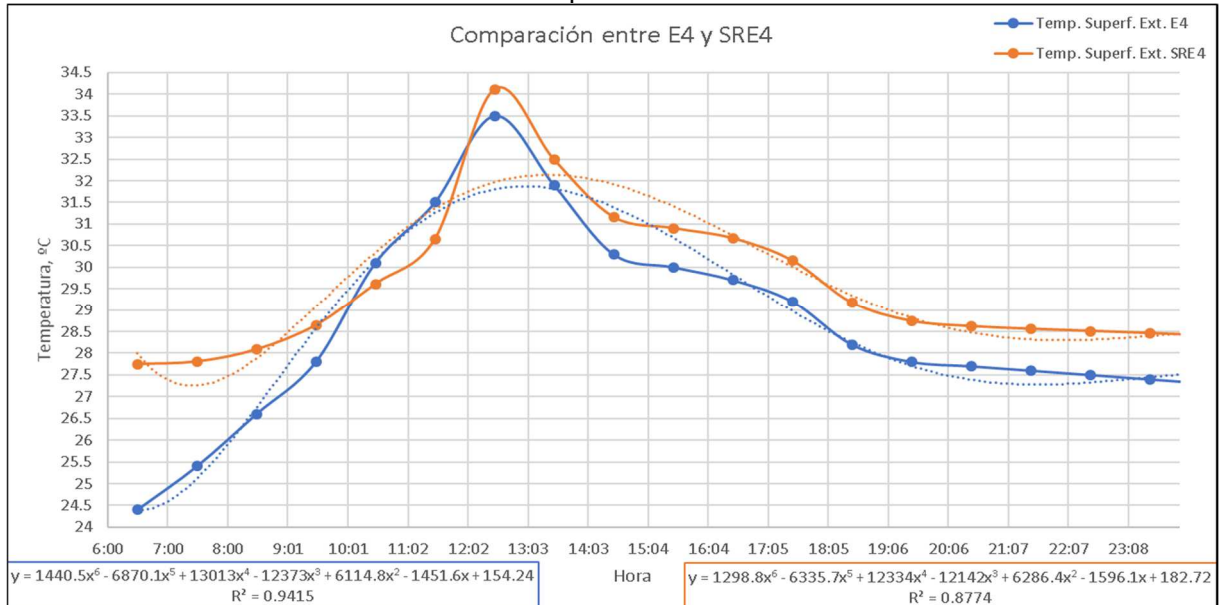
En el gráfico siguiente se representan las curvas de variación horaria de la temperatura superficial interior correspondiente a E4 y la SRE4. Nótese la similitud.

Gráfico 25. Evolución horaria de la temperatura superficial de la cara interior del muro según datos del E4 y SRE4 respectivamente.



El gráfico siguiente proporciona la misma información que el gráfico anterior pero referida a la evolución de la temperatura de la cara exterior del muro conforme a los datos de E4 y SRE4 respectivamente. Nótese el parecido.

Gráfico 26. Evolución horaria de la temperatura superficial exterior según datos de E4 y SRE4 respectivamente.



### 9.5.2. Correspondencia entre los datos obtenidos mediante simulación (SRE) y los obtenidos en la investigación de campo (E)

En la sección anterior se compararon los resultados obtenidos de los siguientes casos:

1. Ensayo de campo y simulación sin placas aislantes en el paramento.
2. Ensayo de campo y simulación con las placas aislantes en la cara interior del paramento.
3. Ensayo de campo y simulación con las placas aislantes en la cara exterior del paramento.
4. Ensayo de campo y simulación con las placas aislantes tanto en la cara exterior como interior del paramento.

De estas comparaciones se infiere que los resultados de las simulaciones son aproximados a los resultados de los ensayos de campo. Los gráficos muestran que ambos resultados tienen la misma tendencia. De las tablas se obtiene que los picos máximos y mínimos se producen a la misma hora tanto en los ensayos de campo como en las simulaciones. La diferencia de estos picos no supera 1 °C. En términos porcentuales, la diferencia entre los valores picos y promedios de la simulación con respecto a los ensayos de campo, no sobrepasan el 3,8 %. Con excepción de dos valores:

- 1) El valor de pico mínimo de la simulación del caso 4 registra una diferencia de 3,34 °C (13,7 %) con respecto al ensayo de campo.
- 2) El valor pico mínimo de la simulación del caso 3 con 1,56 °C (6,4 %) mayor que el del ensayo de campo.

En lo que se refiere a los desfases calculados son semejantes en todos los casos, mientras que en lo que concierne a los amortiguamientos únicamente en el caso 2 llega al 2 % de diferencia.

La R. D. es un país en vías de desarrollo que no cuenta con ninguna cámara climática para realizar ensayos de la naturaleza que se expone en esta tesis. Esta investigación tampoco disponía de recursos para construir una cámara climática ni para construir viviendas en cada zona climática del país para llevar a cabo dichos ensayos. Nadie facilita su vivienda y la desocupa por un tiempo para que le estén clavando placas por dentro, luego quitarlas y clavar placas por fuera, luego clavar de nuevo y colocar placas por dentro y por fuera. En consecuencia, como los resultados de los ensayos de campo y las simulaciones son semejantes, se toma el modelo del programa informático como bueno y válido para realizar diferentes simulaciones que permitan evaluar el comportamiento termoenergético de la vivienda en diferentes circunstancias y trasladar la vivienda a las diferentes zonas climáticas que se han establecido en esta tesis para determinar la mejor configuración que proporciona los mejores resultados en cada zona.

Un punto que puede considerarse débil de la tesis está en la campaña experimental basada únicamente en medidas de temperaturas superficiales del muro. Sin embargo, al ser el muro analizado un elemento relativamente sencillo de modelar y de materiales conocidos, se puede considerar bastante fiable el modelo para el análisis principal realizado en *DesignBuilder*, para analizar en forma de comparativa todos los casos simulados y obtener conclusiones de interés.

En lo adelante se presentan los resultados de diferentes simulaciones realizadas:

1. Se evalúa la influencia de la orientación de la vivienda.
2. Se evalúa la influencia de que la casa esté adosada.
3. Se evalúa la influencia de tener un muro de cierre del patio.
4. Se evalúa la influencia de colocar las placas aislantes en todos los paramentos exteriores y cubierta de la vivienda, combinando con cámaras de aire entre las placas y el muro, en diferentes posiciones: interior, exterior, tanto exterior como interior.
5. Influencia de aumentar el grosor y mejora de las placas aislantes.
6. Se evalúa la influencia de la infiltración.
7. Aprovechar la ventilación natural cuando la temperatura exterior baje.
8. Se evalúa el comportamiento de la misma vivienda colocada en las diferentes zonas climáticas establecidas en esta tesis.

#### 9.5.3. Simulaciones efectuadas suponiendo nuestra vivienda ubicada en distintas zonas climáticas y con diferentes diseños de construcción

Habiéndose puesto de manifiesto la idoneidad de las simulaciones con el software *DesignBuilder* se procedió a simular el comportamiento de nuestra vivienda de referencia suponiéndola ubicada en cada una de las zonas climáticas en las que caracterizamos en el capítulo 4 la República Dominicana.

Para analizar las diferentes simulaciones se eligieron los siguientes parámetros: temperatura de bulbo seco promedio en el interior de la vivienda y consumo de

energía con la vivienda utilizando equipo de refrigeración para mantener temperatura interior de confort, 26 °C.

Para la mencionada simulación se tomaron las condiciones meteorológicas del día más cálido correspondiente a cada una de las localidades elegidas para cada zona climática. De los datos climáticos horario típico (TMY) de *DesignBuilder*.

Para la simulación correspondiente a la zona climática V4V4 cuya severidad climática es SCAO durante todo el año se eligió la localidad "Santo Domingo" cuya temperatura promedio de cada día del año y de cada mes se recogen en la tabla siguiente, en la que se observa que el día más cálido se corresponde con el 27 de septiembre, siendo este mes también el más cálido.

Tabla 65. Temperatura promedio del TMY de *DesignBuilder* para Santo Domingo.

Temperatura de bulbo seco promedio diaria (°C)												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	24,01	24,80	24,37	25,41	27,07	26,19	26,33	26,99	27,24	27,36	26,46	24,73
2	24,49	24,96	25,35	25,94	24,80	26,34	26,52	27,59	27,34	26,43	26,47	25,72
3	24,39	24,59	25,92	26,07	25,52	25,85	26,94	26,93	27,28	26,23	26,65	26,81
4	24,76	24,06	25,95	25,55	26,81	25,67	25,71	25,53	27,66	25,99	26,60	25,00
5	23,57	24,41	25,70	27,09	26,13	26,26	26,36	26,12	27,42	26,36	26,83	24,50
6	24,34	24,52	25,37	27,69	26,43	24,97	26,51	26,57	28,43	26,83	26,47	24,72
7	24,96	24,98	24,93	27,16	26,53	25,77	26,11	26,30	28,48	27,06	26,11	24,53
8	23,71	24,63	24,50	27,01	27,12	25,89	26,29	27,16	26,67	26,94	26,15	24,58
9	23,99	24,61	24,96	26,46	27,53	25,67	26,27	27,05	26,07	27,47	26,04	24,31
10	24,12	24,66	24,84	27,07	26,07	26,56	26,63	26,88	26,77	26,63	25,61	25,00
11	24,28	24,78	24,93	26,70	26,68	26,67	27,50	26,92	27,15	26,71	25,51	25,09
12	24,31	24,77	24,21	26,26	26,26	26,08	27,77	26,69	27,41	27,63	25,65	25,16
13	24,56	24,08	24,66	23,60	25,54	26,29	26,97	27,74	26,88	27,74	25,69	24,72
14	24,89	24,09	24,67	23,47	26,15	26,34	26,68	27,87	27,22	27,26	25,60	25,07
15	25,22	25,04	24,27	24,42	25,72	26,71	26,49	27,14	27,17	26,91	25,85	25,15
16	22,04	24,99	24,69	25,76	26,33	26,88	26,12	26,93	26,77	26,54	25,63	25,40
17	22,71	24,36	24,29	25,96	26,38	26,56	26,46	26,77	25,98	27,04	25,62	25,23
18	23,97	24,56	24,05	26,14	27,31	25,72	26,17	26,28	25,98	26,83	25,73	24,93
19	24,44	25,71	24,84	26,58	26,68	26,19	25,98	26,55	25,92	26,35	25,08	24,89
20	24,28	23,63	25,14	27,61	25,15	25,59	26,16	26,94	25,63	26,53	24,78	24,25
21	24,56	24,06	25,01	28,04	25,25	25,59	26,33	26,80	26,39	26,48	25,62	24,41
22	25,05	24,75	22,89	26,92	27,14	25,98	27,10	27,16	26,73	27,13	27,39	24,66
23	24,46	24,71	23,29	26,53	26,78	26,07	26,41	27,04	26,59	27,97	25,73	24,27
24	24,26	24,55	24,35	26,41	26,27	25,94	26,30	26,97	26,05	27,61	23,76	22,63
25	24,36	24,93	24,32	25,80	25,64	26,06	26,51	26,75	26,63	26,79	24,87	23,62
26	25,21	25,42	25,02	25,77	26,56	26,16	26,30	25,44	26,91	26,45	25,51	24,54
27	22,80	25,67	26,07	27,14	26,63	25,92	26,42	25,38	<b>29,39</b>	26,58	24,58	24,98
28	21,61	26,17	23,81	27,68	26,40	26,35	26,18	26,71	26,55	27,01	24,13	24,81
29	22,54		24,40	27,47	26,07	25,90	26,65	26,78	26,16	26,69	24,40	24,74
30	23,22		25,01	26,95	25,62	25,95	26,88	27,10	27,11	26,93	24,22	25,03
31	24,56		25,38		26,02		26,86	26,69		27,35		24,85
<b>Promedio</b>	24,05	24,73	24,75	26,36	26,28	26,07	26,51	26,77	<b>26,93</b>	26,90	25,63	24,78

En lo que se refiere a la simulación correspondiente a la zona climática diferenciada V1V3 cuya severidad climática es SCLiNM de noviembre a marzo y SCAO de abril a octubre se eligió la localidad "La Vega" cuya temperatura promedio de cada día del año y de cada mes se recogen en la tabla siguiente, en la que se observa que el día más cálido se corresponde con el 24 de agosto, siendo este mes también el más cálido.

Tabla 66. Temperatura promedio del TMY de *DesignBuilder* para La Vega.

<b>Temperatura de bulbo seco promedio diaria (°C)</b>												
<b>Día</b>	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>	<b>Diciembre</b>
1	19,74	21,52	22,86	20,17	22,74	24,26	24,15	24,14	24,01	23,54	23,08	21,88
2	19,01	21,14	23,57	20,38	23,12	23,78	24,15	24,14	23,59	23,71	22,63	21,68
3	20,40	22,38	24,54	19,95	23,44	23,48	24,08	24,54	23,26	23,38	23,02	20,94
4	21,66	23,02	23,55	21,15	23,04	23,23	23,43	24,34	23,79	23,50	23,11	20,85
5	21,81	21,85	21,03	22,20	22,87	23,06	23,82	24,59	24,22	23,40	23,80	20,84
6	21,23	22,82	20,72	22,40	22,83	23,13	24,07	24,36	24,43	23,41	24,11	21,26
7	21,70	23,37	21,30	21,83	23,26	23,02	23,67	25,25	24,13	23,60	23,95	21,35
8	21,15	21,07	22,14	22,58	24,34	23,03	23,83	24,24	23,52	23,58	23,10	21,99
9	20,62	19,19	22,54	23,00	23,00	23,25	23,73	24,11	23,86	23,81	22,26	21,83
10	20,96	18,42	22,20	22,71	22,56	23,19	23,81	23,99	24,15	24,09	21,98	21,71
11	20,75	19,22	21,67	21,83	22,62	23,28	24,43	24,74	23,79	24,37	22,43	21,53
12	20,91	19,55	21,51	21,80	22,68	23,67	24,37	24,65	23,65	24,41	22,02	21,64
13	20,66	20,41	21,98	22,80	23,38	23,70	24,97	24,55	23,94	23,82	21,84	21,42
14	20,40	21,82	22,34	23,44	23,94	24,35	24,65	24,57	24,21	24,41	22,39	20,80
15	20,77	22,04	22,62	23,65	23,46	24,56	23,82	24,41	24,41	24,40	22,77	19,91
16	20,13	21,98	21,89	23,29	22,89	23,73	23,58	23,96	24,67	24,40	23,09	20,10
17	20,46	22,48	21,91	21,66	22,96	23,94	23,89	23,99	24,51	23,59	22,97	20,11
18	21,07	22,93	21,86	22,49	23,03	23,68	23,52	24,37	24,54	23,76	23,06	20,35
19	21,34	22,01	22,06	22,96	22,93	23,70	23,44	23,42	24,74	23,05	22,43	20,01
20	22,19	22,24	21,99	22,47	22,79	23,65	23,73	24,08	24,55	22,98	22,23	19,82
21	22,43	22,47	22,34	23,67	22,68	23,01	23,82	24,27	24,65	23,31	22,01	20,11
22	20,62	22,39	23,38	23,77	23,16	23,59	24,13	25,08	24,66	23,34	22,06	20,84
23	20,32	22,26	23,53	24,43	23,23	23,88	23,42	25,39	24,76	23,76	21,60	20,97
24	20,87	22,56	22,77	23,10	23,43	24,17	23,73	25,96	24,75	23,43	21,14	21,15
25	21,18	20,73	22,18	22,16	23,99	23,57	23,95	24,13	24,69	22,57	21,14	21,03
26	20,88	20,17	22,02	22,02	24,15	24,03	23,73	23,73	25,25	22,06	21,32	20,94
27	20,69	21,11	21,05	21,52	24,19	23,62	23,87	24,33	25,33	22,90	21,18	20,97
28	20,59	22,43	21,72	22,20	23,16	22,93	23,84	25,10	24,98	23,18	20,59	21,24
29	20,84		22,32	22,94	24,16	23,34	24,00	24,83	24,02	22,92	21,10	21,38
30	21,82		22,44	23,14	24,24	23,61	24,40	24,76	23,53	23,05	21,42	21,69
31	21,59		21,66		23,40		24,38	24,39		22,59		21,11
<b>Promedio</b>	20,93	21,56	22,25	22,39	23,28	23,58	23,95	24,46	24,29	23,49	22,33	21,01

En lo que se refiere a la simulación correspondiente a la zona climática V1V2 cuya severidad climática es SCLiNM durante todo el año se eligió la localidad "Constanza" cuya temperatura promedio de cada día del año y de cada mes se recogen en la tabla siguiente, en la que se observa que el día más cálido se corresponde con el 24 de agosto , siendo este mes también el más cálido.

Tabla 67. Temperatura promedio del TMY de *DesignBuilder* para Constanza.

Temperatura de bulbo seco promedio diaria (°C)												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	18,38	19,72	19,97	20,93	21,75	23,05	22,80	22,97	23,04	22,33	22,15	19,95
2	17,83	19,57	20,03	20,45	21,63	22,79	22,95	23,02	23,44	22,36	21,62	19,54
3	19,32	19,32	20,63	20,84	21,98	22,63	22,88	23,42	22,64	22,13	21,79	18,54
4	20,53	18,45	21,51	21,11	22,49	22,48	22,08	23,34	21,99	22,22	21,72	19,07
5	20,83	19,21	19,50	20,65	22,59	22,61	22,49	23,41	22,15	22,11	22,50	19,69
6	20,07	20,30	18,66	20,95	22,27	23,11	22,78	23,15	22,61	22,27	23,02	19,84
7	20,27	20,40	20,08	21,69	21,66	23,38	22,36	23,95	22,81	22,56	22,82	20,45
8	19,90	20,65	18,63	22,83	20,88	22,63	22,56	23,13	23,28	22,57	21,98	19,85
9	19,51	19,91	17,05	21,01	21,02	22,54	22,48	23,01	23,33	22,91	21,25	19,78
10	19,74	20,40	17,83	21,01	21,15	22,38	22,61	22,82	23,05	23,18	20,89	19,84
11	19,30	20,31	18,65	21,12	20,71	21,93	22,91	23,57	23,54	23,60	21,32	20,30
12	19,48	20,33	19,59	21,01	20,81	21,83	22,84	23,39	22,68	23,90	20,53	21,66
13	19,13	20,72	19,28	20,81	21,54	21,69	23,24	23,43	22,25	23,13	20,54	21,88
14	19,06	20,70	19,66	20,96	21,61	22,01	22,97	23,55	22,26	23,24	21,09	19,49
15	19,43	20,62	21,07	21,21	22,16	21,92	22,48	23,27	22,46	23,48	21,66	19,46
16	19,02	20,11	20,78	21,84	21,80	21,95	22,33	22,90	22,42	23,32	21,91	20,25
17	19,12	19,56	20,88	22,43	22,02	21,48	22,67	22,88	21,74	22,17	21,60	20,44
18	20,10	18,87	20,81	20,80	21,87	21,59	22,34	23,05	22,47	22,36	21,59	19,83
19	20,11	18,93	20,77	19,74	21,37	21,82	22,14	22,31	22,87	21,85	21,05	19,87
20	20,82	18,55	20,30	20,53	21,56	21,88	22,55	22,97	23,33	21,91	20,92	20,33
21	21,87	18,31	20,54	22,04	21,72	22,30	22,61	23,13	23,22	22,27	20,74	20,92
22	19,83	19,79	21,87	22,12	21,21	22,36	22,77	23,67	24,30	22,44	20,77	21,14
23	19,53	19,26	21,82	21,49	21,10	22,66	22,08	23,89	23,06	23,16	20,26	20,24
24	19,95	18,32	21,94	20,30	21,89	22,60	22,55	24,75	23,17	21,99	19,87	20,19
25	20,08	18,85	22,85	20,13	22,47	22,84	22,81	23,02	23,44	21,41	19,87	19,85
26	19,45	18,71	22,37	20,36	22,85	22,64	22,65	22,52	22,76	20,95	19,95	20,62
27	19,32	18,84	22,02	20,11	23,05	22,29	22,56	23,17	22,71	21,62	19,96	20,91
28	19,43	19,22	20,48	20,06	22,83	21,87	22,54	24,06	23,21	21,84	19,42	20,02
29	19,53		20,27	20,25	22,64	21,68	22,84	23,69	23,00	21,68	19,93	20,49
30	20,63		19,93	19,94	22,36	22,17	23,29	23,45	22,75	21,66	20,29	21,47
31	20,55		19,79		21,76		23,17	23,08		21,51		20,11
<b>Promedio mensual</b>	19,75	19,57	20,31	20,96	21,83	22,30	22,66	23,29	22,87	22,39	21,10	20,19

9.5.3.1. Simulaciones efectuadas considerando la orientación, muro de cierre del patio trasero y de la casa adosada

Las simulaciones realizadas fueron las siguientes:

1. Vivienda adosada con muro de cierre del patio (SRE1).
2. Vivienda adosada sin el muro de cierre del patio.
3. Vivienda unifamiliar sin muro de cierre del patio.
4. Vivienda unifamiliar con muro de cierre del patio.

La figura siguiente muestra los casos anteriores.

Figura 87. Vivienda con y sin muro de cierre del patio, adosada o no.



Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo abierto (puertas y ventanas "On 24/7") como es la tradición, en la pestaña "Actividad" estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1), en la pestaña "HVAC" sin refrigeración. Luego, para

evaluar el consumo de energía entre las diferentes simulaciones, la configuración se cambió a: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "HVAC" con la refrigeración encendida ("On 24/7"), en la pestaña "Actividad" temperatura de consigna de 26 °C y estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1).

En la tabla siguiente se muestran los resultados de la temperatura de bulbo seco interior y consumos energéticos de las simulaciones antes mencionadas.

Tabla 68. Variación de la temperatura interior y el consumo según la orientación, muro y casa adosada.

Orientación	1. SRE1		2. Casa pareada sin muro		3. Casa no pareada sin muro		4. Casa no pareada con muro	
	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)
<b>Norte (N, 0°, 360°)</b>	30,03	69,17	30,06	69,33	30,21	66,71	30,19	66,42
<b>Noreste (NE, 45°)</b>	29,99	67,81	30,07	68,95	30,12	64,57	30,04	63,29
<b>Este (E, 90°)</b>	29,96	66,8	30,01	68,25	29,97	61,62	29,9	60,25
<b>Sureste (SE, 135°)</b>	29,95	66,35	29,9	65,7	29,96	61,28	29,99	61,97
<b>Sur (S, 180°)</b>	29,91	65,07	29,85	63,9	30,04	62,38	30,09	63,39
<b>Suroeste (SO, 225°)</b>	29,88	65,21	29,87	65,1	30,08	63,35	30,08	63,35
<b>Oeste (O, 270°)</b>	29,86	65,19	29,98	67,76	30,16	63,18	30,04	60,63
<b>Noroeste (NO, 315°)</b>	29,96	67,6	30,08	69,8	30,26	66,19	30,15	64,28

En cuanto a la temperatura de bulbo seco promedio interior, la más favorable se obtiene con orientación sur en la casa 2 (pareada sin muro de cierre del patio) donde se obtiene la mínima en el interior (29,85 °C); mientras que la máxima (30,26 °C) se obtiene con orientación noroeste en la casa 3 (sin muro de cierre del patio, casa no adosada), siendo esta la menos favorable. Esto supone solo un 1,37 % (0,41 °C de diferencia) de diferencia entre las simulaciones con menor y mayor temperatura de bulbo seco interior.

En cuanto al consumo de energía, el menor consumo (60,25 kWh) se obtiene con orientación este en la casa 4 (no pareada, con muro de cierre en el patio), mientras que el máximo (69,8 kWh) se obtiene con orientación noroeste en la casa 2 (pareada, sin muro de cierre del patio). Esto supone un ahorro de 9,55 kWh por día (13,67 %).



De esta tabla se puede ver que la costumbre de colocar un muro de cierre en el patio puede beneficiar o no según la orientación de la vivienda, al igual se puede ver la influencia de tener una casa adosada.

De estas simulaciones se tomó la más desfavorable, la cual a partir de ahora será llamada "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°) para comparar el comportamiento de las diferentes alternativas en las condiciones más severas.

#### 9.5.3.2. Influencia de la ubicación de las placas aislantes

De la sección anterior se tomó la situación más desfavorable que es "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°) para comparar en las condiciones más severas las diferentes simulaciones realizadas con las placas aislantes en los muros exteriores de la vivienda.

Los diferentes diseños simulados con las placas en los muros exteriores fueron las siguientes:

- I. Diseño 2 sin placas aislantes en muros exteriores de la vivienda.
- II. Diseño 2 con las placas colocadas en la cara interior de los muros exteriores de la vivienda.
- III. Diseño 2 con las placas colocadas en la cara interior de los muros exteriores de la vivienda, pero con una cámara de aire de 5 cm entre las placas y el muro.
- IV. Diseño 2 con las placas colocadas en la cara interior y exterior de los muros exteriores de la vivienda.
- V. Diseño 2 con las placas colocadas en la cara interior y exterior de los muros exteriores de la vivienda, pero con una cámara de aire de 5 cm entre las placas y el muro.
- VI. Diseño 2 con las placas colocadas en la cara exterior de los muros exteriores de la vivienda.
- VII. Diseño 2 con las placas colocadas en la cara exterior de los muros exteriores de la vivienda, pero con una cámara de aire de 5cm entre las placas y el muro.

Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado para aprovechar el efecto aislante de las placas y cámara de aire (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "Actividad" estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1), en la pestaña "HVAC" sin refrigeración. Luego, para evaluar el consumo de energía entre las diferentes simulaciones, la configuración se cambió a: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "HVAC" con la refrigeración encendida ("On 24/7"), en la pestaña "Actividad" temperatura de consigna de 26 °C y estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1).

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos con la simulación de las diferentes colocaciones de las placas aislantes en la envolvente de la vivienda.

Tabla 69. Variación de la temperatura interior y el consumo de energía según la colocación de las placas.

Configuración	Temp. Int. Media sin climatización (°C)	Temp. Int. Media con climatización (°C)	Consumo energía (kWh)	Factor U con película W/(m <sup>2</sup> ·K)	Factor U sin película W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>I. Sin placas</b>	30,35	26,05	69,80	2,21	3,303
<b>II. Placas en el interior</b>	30,32	26,05	69,02	2,068	2,994
<b>III. Placas en el interior más cámara de aire</b>	30,23	26,04	66,36	1,382	1,743
<b>IV. Placas en el interior-exterior</b>	30,38	26,05	69,54	1,942	2,738
<b>V. Placas en el interior-exterior más cámara de aire</b>	30,20	26,05	65,40	1,005	1,183
<b>VI. Placas en el exterior</b>	30,41	26,05	70,40	2,068	2,994
<b>VII. Placas en el exterior más cámara de aire</b>	30,28	26,05	67,87	1,382	1,743

En esta tabla se puede ver cómo la colocación de las placas afecta la temperatura de bulbo seco promedio interior, el factor U y el consumo de energía en refrigeración para mantener la temperatura interior en el rango de confort elegido. La temperatura varía solo décimas con una diferencia de 0,21 °C (0,70 %) entre la mínima (relleno azul) y la máxima registrada (relleno rojo). El diseño V registró el valor mínimo (30,20 °C) mientras que el diseño VI registró el valor máximo (30,41 °C). Mientras tanto, la variación de los consumos de energía es mayor que la obtenida con las temperaturas con 5 kWh (7,6 %) de diferencia entre el mínimo y máximo registrado, siendo el diseño V el que registró el menor consumo (65,4 kWh) y el diseño VI el máximo (70,4 kWh).

Se puede ver que el diseño VI (placas colocadas en la cara exterior) es peor aún que el diseño I (vivienda sin placas, como en la realidad). Este fenómeno puede ser explicado por el efecto de la inercia térmica. Durante el día el muro desnudo en la cara interior recibe el calor desde el interior de la vivienda para luego devolver ese calor en la noche, pero también, ese muro requiere mayor cantidad de energía para ser refrigerado. Mientras que con el aislante por la cara interior las condiciones son más favorable. Esto constata la idea de que para climas cálidos, para fines de refrigeración, es mejor colocar el aislamiento en la cara interior de los muros. Si se puede combinar el diseño de colocar aislamiento tanto por el interior como por el exterior (diseño V) el resultado es más favorable, de esa forma impide la entrada del calor exterior, pero tampoco se acumula (o se acumula poco) el calor del interior.

Para las siguientes simulaciones se tomará el diseño V (Placas en la cara interior-exterior más cámara de aire) como patrón de comparación por ser la que ha mostrado los mejores resultados y se comparará con otras opciones, como por ejemplo, ver el efecto de la infiltración, ver el efecto de aislar también el techo/cubierta, entre otras.

### 9.5.3.3. Influencia de las infiltraciones

Hasta ahora se había simulado todo con la estanqueidad al aire muy pobre, en este apartado se presenta cómo influye la infiltración de aire en el consumo energético. Con el diseño V (Placas en cara interior-externa más cámara de aire) como patrón de comparación, la tabla siguiente muestra los resultados.

Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado para aprovechar el efecto aislante de las placas y cámara de aire (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "Actividad" estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1), en la pestaña "HVAC" sin refrigeración. Luego, para evaluar el consumo de energía entre las diferentes simulaciones, la configuración se cambió a: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "HVAC" con la refrigeración encendida ("On 24/7"), en la pestaña "Actividad" temperatura de consigna de 26 °C y estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1), no estanco.

Para el diseño sin infiltraciones "diseño V estanco" se realizó lo mismo que en el caso descrito en el párrafo anterior pero en la pestaña "Actividad" elegida la opción sin infiltraciones de aire.

Tabla 70. Influencia de la infiltración en los consumos energéticos.

<b>Variación de la temperatura interior y el consumo con relación a la infiltración</b>				
<b>Configuración</b>	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)	Factor U con película W/(m <sup>2</sup> ·K)	Factor U sin película W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Diseño V, no estanco</b>	30,20	65,40	1,005	1,183
<b>Diseño V estanco</b>	30,32	34,07	1,005	1,183

De estos datos se desprende que con solo corregir las infiltraciones el consumo se reduce un 47,9 %. A partir de ahora para comparar los siguientes diseños simulados se tomará el diseño V sin las infiltraciones ("Diseño V estanco"). Hay que recordar que, sin infiltraciones, para mantener una calidad de aire interior correcta sería necesario un sistema de ventilación.

#### 9.5.3.4. Influencia del espesor de la placa aislante

En esta sección se presentan los resultados que se obtuvieron variando el espesor de las placas para luego presentar una mejora a dichas placas aislantes.

Tomando como referencia el modelo con 1 cm de espesor en las placas aislantes el cual es equivalente al diseño V sin infiltraciones ("Diseño V estanco"), la tabla siguiente muestra los resultados obtenidos con las simulaciones al variar el espesor de las placas desde 1 cm hasta 6 cm.

Tabla 71. Comparación de las placas con diferentes espesores.

<b>Variación de la temperatura interior y el consumo con relación al espesor</b>				
<b>Configuración</b>	<b>Temp. Int. Media (°C)</b>	<b>Consumo energía (kWh)</b>	<b>Factor U con película W/(m<sup>2</sup>·K)</b>	<b>Factor U sin película W/(m<sup>2</sup>·K)</b>
<b>1 cm</b>	30,32	34,07	1,005	1,183
<b>2 cm</b>	30,30	33,8	0,946	1,102
<b>3 cm</b>	30,29	33,58	0,893	1,031
<b>4 cm</b>	30,28	33,37	0,846	0,968
<b>5 cm</b>	30,27	33,2	0,803	0,913
<b>6 cm</b>	30,26	33,04	0,765	0,864

El espesor de 1 cm corresponde al espesor original de las placas ensayadas en esta tesis y con las cuales se ha simulado todo lo anterior hasta ahora, es decir, equivale al diseño V sin infiltraciones ("Diseño V estanco"). Con los resultados de la tabla anterior se puede ver que el aumento del espesor de la placa no agrega grandes beneficios, teniendo en cuenta que un aumento de espesor también incluye un aumento en masa y peso. Considerando los espesores mínimo y máximo (1 cm-6 cm), se obtiene la mayor reducción del consumo de energía equivalente a 1,03 kWh (34,07 kWh-33,04 kWh). Esta reducción representa tan solo un 3,02 %. También se observa que en la temperatura interior la variación es 0,06 °C. Y con los valores del factor U se alcanza una reducción máxima de 26,96 %.

Vistos los resultados anteriores se procedió a evaluar una propuesta de mejora de las placas, en vez de aumentar el espesor, se propone colocar una capa de papel reciclado impregnada a las placas.

Después de simular varios espesores de capa de papel, en la tabla siguiente se muestran los resultados con un espesor de 5 cm que fue con el que se obtuvieron los mejores resultados. A esta placa la denominaremos como "placas aislantes mejoradas". Esta nueva placa se ubicará en la cara interior de las viviendas.

Tabla 72. Mejora de la placa aislante.

<b>Variación de la temperatura interior y el consumo con relación a la mejora</b>				
<b>Configuración</b>	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)	Factor U con película W/(m <sup>2</sup> ·K)	Factor U sin película W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Diseño V estanco</b>	30,32	34,07	1,005	1,183
<b>Diseño V estanco mejorada</b>	30,17	31,22	0,445	0,477

Con dicha mejora se puede conseguir una reducción de 2,85 kWh del consumo de energía lo que representa un 8,4 % de reducción. Este resultado representa casi el triple del conseguido aumentando el espesor de las placas a 6 cm. También en la temperatura interior y factor U se nota la diferencia con los resultados de aumentando el espesor de las placas. Con esta propuesta se consigue una mejora de 59,68 % en la variación del factor U, más del doble que con el espesor de 6 cm.

#### 9.5.3.5. Influencia de la cubierta

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones que ponen de manifiesto la influencia de la cubierta junto al diseño en los muros exteriores que tuvo mejores resultados ("Diseño V estanco mejorada"), los resultados se muestran en la tabla siguiente.

Los diseños de cubiertas simuladas fueron los siguientes:

- A. Cubierta con techo verde.
- B. Cubierta con poliestireno y grava.
- C. Cubierta con las placas aislantes más la cámara de aire colocadas en la parte exterior, al mismo tiempo colocada en la parte interior las placas aislantes mejoradas más la cámara de aire.

Tabla 73. Influencia de la cubierta.

<b>Variación de la temperatura interior y el consumo con la cubierta.</b>				
<b>Configuración</b>	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)	Factor U con película W/(m <sup>2</sup> ·K)	Factor U sin película W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Diseño V estanco mejorada</b>	30,17	31,22	3,853	8,185
<b>Diseño A</b>	28,68	16,80	0,363	0,382
<b>Diseño B</b>	28,86	18,11	0,45	0,479
<b>Diseño C</b>	28,92	18,59	0,474	0,507

Los valores de factor U de la cubierta "diseño V estanco mejorada" (relleno azul celeste) corresponden a la cubierta de la vivienda real como fue descrita en la sección 8.1. Este factor U sin película para techo no aislado térmicamente está dentro del rango obtenido en estudio experimental en (174) que para techo sin aislamiento fue de  $7,76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ - $18,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Igualmente el factor U del techo verde de esta tesis (Diseño A) es semejante al encontrado en el estudio experimental antes mencionado que para techo verde fue de:  $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ - $0,34 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

En cuanto al consumo de energía, el factor U y la temperatura de bulbo seco interior, resaltar primero el salto cuantitativo que supone el diseño de la cubierta y no solo en los muros. Dependiendo del tipo de cubierta se consigue una reducción en el consumo de energía de  $14,42 \text{ kWh}$  a  $12,63 \text{ kWh}$  ( $46,2 \%$ - $40,45 \%$ ) y una disminución de la temperatura interior de  $1,49 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $1,25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $4,94 \%$ - $4,14 \%$ ). Estos resultados ponen de manifiesto que la mayor carga térmica viene a través de la cubierta. Los valores de factor U presentados corresponden a las cubiertas.

Se puede ver que la menor temperatura en el interior de la vivienda, el menor factor U y el menor consumo de energía se consigue combinando el "diseño V estanco mejorada (relleno azul) + el diseño de cubierta A (techo verde)", con una diferencia en la temperatura interior desde  $30,17 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $28,68 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $1,49 \text{ }^\circ\text{C}$ ) lo que representa una reducción del  $4,94 \%$ ; una reducción del consumo de  $31,22 \text{ kWh}$  a  $16,80 \text{ kWh}$  ( $14,42 \text{ kWh}$ ) lo cual representa una reducción del  $46,2 \%$  y una disminución del factor U de  $8,185 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  a  $0,382 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  lo que representa una disminución del  $95 \%$ .

La segunda combinación con mejores resultados es la combinación entre "diseño V estanco mejorada (relleno azul)" con "diseño de cubierta B (poliestireno y grava)", en este caso la diferencia en la temperatura interior es desde  $30,17 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $28,86 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $1,31 \text{ }^\circ\text{C}$ ) lo cual representa una reducción del  $4,34 \%$ ; en cuanto al consumo la diferencia es de  $31,22 \text{ kWh}$  a  $18,11 \text{ kWh}$  ( $13,11 \text{ kWh}$ ) lo que representa una reducción del  $41,99 \%$ . El factor U disminuye  $7,706 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  lo que representa un  $94,15 \%$ .

Por último está la combinación entre "diseño V estanco mejorada y diseño de cubierta C", esta presenta una disminución de la temperatura desde  $30,17 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $28,92 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $1,25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) igual al  $4,14 \%$ ; con relación al consumo de energía la disminución es desde  $31,22 \text{ kWh}$  hasta  $18,59 \text{ kWh}$  ( $12,63 \text{ kWh}$ ) igual al  $40,45 \%$  de ahorro. En cuanto al factor U la disminución es de  $7,678 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  para un  $93,9 \%$ .

El mayor ahorro se consigue con cubierta verde ("diseño de cubierta A") teniendo en cuenta que todo depende del tipo de cubierta verde colocada, pero si quieres prescindir de la operación y mantenimiento que conlleva un techo verde se puede optar por "diseño de cubierta B", pero si lo que quieres es prescindir de todo lo que es plástico y productos derivados del petróleo se puede optar por "diseño de cubierta C" que supone un  $5,75 \%$  de diferencia con relación a la cubierta verde, también se debe tomar en cuenta el coste económico de "diseño de cubierta C" ya que este solo utilizaría las placas y cámara de aire, recordando que el aire es gratis.

### 9.5.3.6. Influencia de las ventanas

En esta sección se presentan los resultados de la influencia de diferentes ventanas en la variación del consumo de energía y temperatura de bulbo seco promedio en el interior de la vivienda. Para estos casos se ha utilizado, de la sección anterior, el "diseño de C" para simular los efectos en un edificio. Se ha simulado el "diseño C" con:

- a) Ventanas doble hoja de vidrio claro de 3 mm con aire de 6 mm y marco de aluminio con rotura de puente térmico.
- b) Ventanas doble hoja de vidrio claro de 3 mm con aire de 6 mm y marco de madera.
- c) Ventanas doble hoja de vidrio gris de 3 mm con aire de 6 mm y marco de madera.
- d) Ventanas doble hoja de vidrio gris de 3 mm con aire de 6 mm y marco de aluminio con rotura de puente térmico.

La tabla siguiente muestra los resultados de cómo varía la temperatura interior y el consumo de energía con equipo de refrigeración.

Tabla 74. Influencia de la ventana en la variación de la temperatura interior y el consumo de energía.

<b>Variación de la temperatura interior y el consumo con la capa de aire</b>		
<b>Configuración</b>	<b>Temp. Int. Media (°C)</b>	<b>Consumo energía (kWh)</b>
<b>a</b>	28,91	18,27
<b>b</b>	28,90	18,15
<b>Diseño C</b>	28,92	18,59
<b>c</b>	28,88	18,02
<b>d</b>	28,89	18,12

De estos resultados se puede ver que la influencia de la ventana es escasa o baja. En cuanto a la temperatura de bulbo seco interior la diferencia es solo cuestión de décimas y centésimas con un máximo de 0,14 %. En cuanto al consumo de energía, desde el diseño C (18,59 kWh) hasta la ventana c (18,02 kWh) que tiene mejor resultado solo hay una reducción de 0,57 kWh lo que representa un 3,06 %. Con vidrios claros, entre marco de madera y aluminio solo hay una diferencia de 0,12 kWh (0,66 %). Con el mismo marco de madera, entre vidrio gris y claro solo hay una diferencia de 0,13 kWh (0,72 %). Con el vidrios gris, entre marco de madera y aluminio solo hay una diferencia de 0,1 kWh (0,55 %). Con el marco de aluminio, entre vidrio claro y gris la diferencia es de 0,15 kWh (0,82 %).

Para fines de esta tesis se propone las ventanas de doble hoja gris con marco de aluminio con rotura de puente térmico ("diseño C + d"), porque la madera requiere cierto tratamiento para mantenerse por mucho tiempo en climas de alta radiación solar y lluvia.

9.5.3.7. Influencia del aprovechamiento de la ventilación natural abriendo las ventanas cuando la temperatura exterior sea inferior a la temperatura en el interior de las viviendas

Anteriormente se mostraron las temperaturas de bulbo seco promedio para todos los días del año típico (TMY), de dicha tabla se obtuvo el día más cálido (27 de septiembre). Hasta ahora solo se han mostrado los resultados de las simulaciones para el día más cálido registrado en el archivo climático obtenido para la localidad "Santo Domingo".

En las tablas siguientes se muestran los valores para las temperaturas de bulbo seco máximas y mínimas registradas para cada día del año típico (TMY).

Tabla 75. Temperatura máxima diaria del TMY para la localidad "Santo Domingo".

Temperatura máxima diaria (°C)												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	26,97	28,62	29,97	30,97	33,79	27,62	28,21	30,19	31,03	30,90	28,06	27,68
2	28,72	29,69	31,82	31,83	27,67	27,85	28,93	32,20	29,25	28,66	28,98	28,63
3	28,60	28,91	31,71	32,01	29,03	27,17	30,04	31,68	28,35	29,12	30,19	30,15
4	28,78	29,18	31,57	30,41	33,39	27,15	27,42	26,84	29,59	28,03	29,83	27,47
5	28,62	29,00	31,55	31,86	32,96	28,92	28,15	29,23	30,89	28,31	31,24	27,54
6	27,50	29,39	30,82	33,06	33,93	25,89	28,81	29,24	30,53	28,53	29,76	28,69
7	28,62	29,44	29,94	34,20	34,14	27,35	27,91	28,34	31,82	29,30	29,08	27,76
8	27,92	29,69	29,20	33,48	34,04	27,14	28,16	31,18	29,25	29,16	29,52	28,42
9	27,49	29,32	30,91	31,96	34,96	27,02	28,11	30,29	27,99	32,39	28,53	26,56
10	26,82	29,01	31,67	33,03	31,68	29,67	28,88	29,69	30,65	30,10	28,10	28,65
11	27,49	30,05	31,63	30,55	33,45	29,95	31,59	29,61	31,33	28,11	28,62	28,39
12	28,10	30,00	29,84	31,14	33,00	28,50	31,35	28,95	30,60	30,03	29,43	29,48
13	28,38	29,38	31,29	30,03	29,31	29,42	30,19	33,14	28,51	33,25	28,58	27,69
14	28,76	29,24	30,89	30,11	33,15	29,03	29,96	32,85	29,08	32,64	28,42	29,25
15	28,23	30,64	28,01	31,15	29,39	30,61	28,90	30,85	28,57	29,95	28,17	29,24
16	26,92	29,93	29,36	32,65	28,99	31,10	28,11	28,76	29,30	29,88	28,35	29,25
17	27,85	28,66	28,40	31,53	28,66	29,56	28,66	29,69	30,19	31,35	29,59	29,24
18	28,80	29,68	28,75	33,07	31,22	27,68	28,49	28,11	29,09	31,57	30,22	28,92
19	28,72	30,55	31,54	33,13	30,69	28,90	27,64	29,22	28,34	29,76	28,62	28,85
20	28,03	28,20	32,46	34,32	27,27	28,55	27,46	29,98	27,36	27,62	29,95	27,57
21	28,84	28,82	31,99	34,48	27,70	28,25	27,75	28,86	28,73	27,60	29,63	28,36
22	29,52	30,04	26,30	32,06	31,54	28,06	30,18	30,42	28,40	28,20	30,29	28,66
23	28,65	30,38	26,72	29,75	29,00	29,23	29,26	29,36	28,12	29,30	29,81	27,43
24	29,36	30,28	29,09	29,35	29,34	29,19	28,19	29,47	28,89	28,71	26,55	24,18
25	29,23	29,82	28,71	28,54	27,99	28,94	28,37	29,49	30,58	28,50	27,80	26,38
26	29,97	30,32	28,83	29,27	29,71	29,58	28,38	27,07	29,07	29,39	29,26	28,05
27	27,16	29,85	30,44	32,76	29,24	28,78	29,46	26,77	<b>34,21</b>	29,67	28,06	28,94
28	25,98	31,19	27,82	33,53	29,00	28,89	28,47	29,16	28,74	29,17	28,66	28,80
29	27,47		28,76	33,82	28,52	28,25	29,45	29,22	28,34	28,23	28,52	28,77
30	28,54		29,47	32,62	28,01	27,89	29,57	29,46	28,71	29,68	28,09	29,00
31	29,91		29,12		29,09		29,09	28,86		31,30		29,09



Tabla 76. Temperatura mínima diaria del TMY para la localidad "Santo Domingo".

Temperatura mínima diaria (°C)												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	21,75	22,39	21,14	21,42	23,23	25,04	25,04	24,62	24,51	25,33	25,49	22,39
2	21,65	20,50	21,33	21,80	23,04	25,17	24,77	24,07	26,12	24,63	25,05	23,17
3	21,36	21,82	21,82	21,05	23,10	24,93	25,06	23,91	26,29	24,42	23,96	25,12
4	21,07	20,71	22,08	21,78	22,69	24,68	24,48	24,33	26,11	24,81	24,60	23,51
5	20,10	21,19	22,01	24,06	21,49	23,94	25,20	24,16	24,28	25,07	23,70	22,88
6	20,89	21,79	21,91	24,19	20,85	24,28	25,08	24,72	27,09	25,63	24,41	22,42
7	21,46	21,83	22,12	22,89	20,59	24,62	24,95	24,85	26,46	25,76	24,33	22,70
8	21,01	21,27	21,39	22,78	21,06	24,96	25,11	24,56	25,04	25,42	24,38	22,49
9	21,80	21,59	20,98	22,93	21,91	24,61	25,23	25,06	24,13	24,45	24,48	22,65
10	22,54	21,82	20,83	23,18	22,10	24,83	25,16	24,80	23,97	24,29	24,16	22,83
11	22,20	21,13	21,07	24,62	21,45	24,32	25,07	25,00	24,80	25,39	23,65	23,15
12	21,92	21,48	20,78	21,30	21,76	24,09	25,54	24,83	24,82	25,38	23,35	22,62
13	22,34	20,41	20,29	19,74	23,05	23,86	25,14	24,48	25,87	24,51	24,00	22,95
14	22,15	20,62	20,65	19,04	21,63	24,17	24,61	24,60	25,99	24,25	24,05	22,00
15	20,54	21,38	21,14	19,69	23,27	24,33	24,35	24,49	26,17	24,35	24,68	22,28
16	19,00	21,43	20,51	20,93	23,96	23,43	24,61	25,81	24,76	23,97	23,88	23,17
17	19,19	21,50	21,09	22,36	24,60	24,05	24,97	25,28	23,79	24,39	22,91	22,97
18	20,69	21,50	20,77	22,00	23,43	24,27	24,61	25,16	23,76	23,56	23,16	22,69
19	22,35	21,53	20,33	22,16	23,59	24,17	24,91	24,71	24,25	23,55	22,47	22,61
20	22,32	21,09	20,09	23,32	23,65	23,44	25,21	24,54	24,46	25,58	21,34	22,36
21	22,00	20,73	20,89	23,28	23,62	23,51	25,37	25,26	24,75	25,50	22,21	21,93
22	22,67	21,48	21,12	23,41	24,24	24,52	24,80	25,27	25,70	26,55	25,43	22,22
23	21,93	21,16	20,87	24,36	24,56	23,26	24,25	25,30	25,20	26,70	22,61	22,23
24	21,24	20,73	20,95	24,15	24,13	23,04	24,95	25,29	24,40	25,76	22,42	21,61
25	20,43	22,01	20,67	24,13	23,84	24,21	25,02	25,20	24,20	25,17	22,87	21,17
26	21,04	22,56	21,93	23,76	24,52	23,85	24,85	24,57	24,48	24,27	23,40	22,46
27	19,82	22,74	22,76	23,20	25,00	24,08	24,59	24,39	<b>26,40</b>	24,98	21,83	23,07
28	19,19	21,41	21,53	23,45	24,58	24,44	25,05	25,06	24,98	25,51	21,39	22,65
29	19,29		21,18	23,50	24,77	24,10	24,74	25,13	24,47	25,81	21,46	22,49
30	19,70		21,99	23,16	24,09	24,41	25,40	25,18	26,01	25,25	21,40	22,77
31	20,87		22,78		23,93		25,50	25,09		24,86		22,27

De las tablas anteriores se puede obtener el número de los días que se encuentran en diferentes rangos de temperaturas. Realizando el conteo de los días en rango de 1 °C, en la tabla siguiente se muestran la cantidad de días y los porcentajes del año que representan para cada rango.

Tabla 77. Cantidad y porcentaje de días que pertenecen a cada rango de temperaturas

<b>Máximas</b>			<b>Mínimas</b>		
<b>Rango de temp. (°C)</b>	<b>Total de días</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Rango de temp. (°C)</b>	<b>Total de días</b>	<b>Porcentaje</b>
24-25	1	0,3 %	>=27	1	0,3 %
25-26	2	0,5 %	26-27	9	2,5 %
26-27	10	2,7 %	25-26	54	14,8 %
27-28	39	10,7 %	24-25	101	27,7 %
28-29	110	30,1 %	23-24	49	13,4 %
29-30	100	27,4 %	22-23	51	14,0 %
30-31	39	10,7 %	21-22	63	17,3 %
31-32	31	8,5 %	20-21	28	7,7 %
32-33	12	3,3 %	19-20	9	2,5 %
33-34	14	3,8 %	18-19	0	0,0 %
34-35	7	1,9 %			
35-36	0	0,0 %			
	<b>365</b>	<b>100,0 %</b>		<b>365</b>	<b>100,0 %</b>

Para mejor comprensión, en los gráficos siguientes se presentan los porcentajes que corresponden a cada rango de temperatura máxima y los porcentajes para las temperaturas mínimas.

Gráfico 27. Porcentajes de cada rango de temperatura máxima (°C).

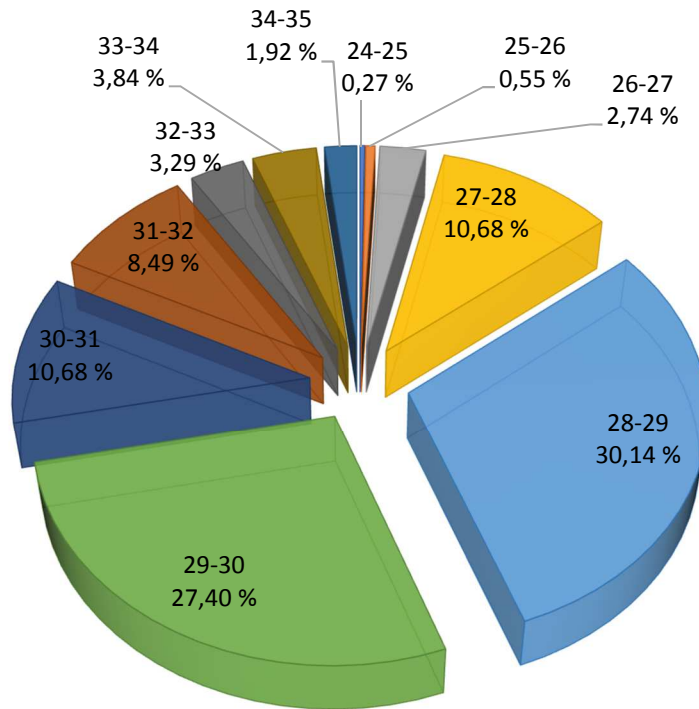
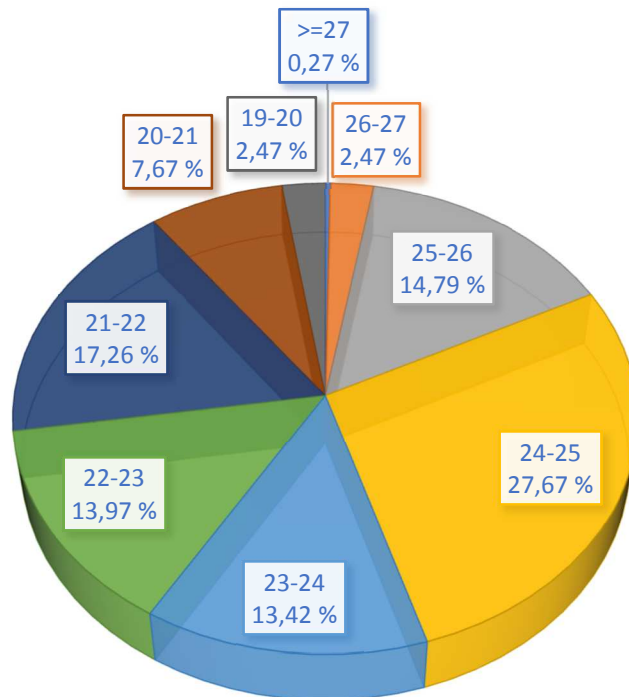


Gráfico 28. Porcentajes de cada rango de temperatura mínima (°C).



De las tablas y gráficos anteriores se deduce que para el día 27 de septiembre, el más cálido, con el cual se han realizado todas las simulaciones hasta ahora, su temperatura máxima es 34,21 °C y la mínima es 26,40 °C. Esto pone de manifiesto las condiciones de disconfort incluso para aprovechar la ventilación natural (VN). Se puede ver también que dicha condición está entre las más extremas del año porque solo 7 días (1,9 %) en todo el año tienen temperatura

máxima entre 34 °C y 35 °C y 9 días (2,5 %) en todo el año tienen temperatura mínima entre 26 °C y 27 °C.

No obstante, la mayoría de los días tienen registrada su temperatura máxima en el rango 28 °C-29 °C (30,1 %) y 29 °C-30 °C (27,4 %). Las temperaturas mínimas se encuentran en el rango 24 °C-25 °C (27,7 %) y 21 °C-22 °C (17,3 %). Con estas condiciones se pueden aprovechar las horas con las temperaturas por debajo de 26 °C (temperatura de consigna elegida) para prescindir del equipo de refrigeración y abrir las ventanas para aprovechar la ventilación natural (VN). La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos con días representativos de los rangos de temperaturas que pertenecen la mayoría de los días.

Se seleccionaron los siguientes días que son representativos de los que pertenecen a los rangos de temperaturas mayoritarios, por lo tanto, representan la mayor parte del año:

- 16 de septiembre con temperatura máxima de 29,30 °C comprendida en el rango 29 °C-30 °C, temperatura mínima de 24,76 °C comprendida en el rango 24 °C-25 °C.
- 18 de septiembre con temperatura máxima de 29,09 °C comprendida en el rango 29 °C-30 °C, temperatura mínima de 23,76 °C comprendida en el rango 23 °C-24 °C.
- 24 de septiembre con temperatura máxima de 28,90 °C comprendida en el rango 28 °C-29 °C, temperatura mínima de 24,40 °C comprendida en el rango 24 °C-25 °C.
- 29 de marzo con temperatura máxima de 28,80 °C comprendida en el rango 28 °C-29 °C, temperatura mínima de 21,20 °C comprendida en el rango 21 °C-22 °C.

Tabla 78. Comparación entre diferentes días que se puede aprovechar la ventilación natural (VN).

<b>Variación de la temperatura interior y el consumo energético con la ventilación</b>		
<b>Configuración</b>	<b>Temp. Int. Media (°C)</b>	<b>Consumo energía (kWh)</b>
<b>Diseño C + d (día más cálido)</b>	<b>28,89</b>	<b>18,12</b>
<b>Diseño C + d (16 sept.)</b>	28,20	13,70
<b>Diseño C + d (16 sept.) +VN</b>	27,78	10,65
<b>Diseño C + d (18 sept.)</b>	27,64	9,76
<b>Diseño C + d (18 sept.) +VN</b>	27,02	7,90
<b>Diseño C + d (24 sept.)</b>	27,32	7,54
<b>Diseño C + d (24 sept.) +VN</b>	26,78	6,39
<b>Diseño C + d (29 mar.)</b>	26,69	3,81
<b>Diseño C + d (29 mar.) +VN</b>	25,61	1,64

En rojo, "diseño C + d (día más cálido)" está presente en esta tabla para apreciar y comparar el beneficio de la ventilación natural (VN).

De estos resultados se obtiene que la ventilación natural (VN) puede representar desde un 15,25 % (24 sept.) hasta un 56,96 % (29 mar.) [ 22,26 % (16 sept.),

(19,01 % (18 sept.)). Pero también se puede ver que es posible conseguir una temperatura interior promedio menor de 26 °C lo que haría que se prescindiera de equipos de refrigeración.

Se necesita un análisis más profundo y detallado para saber con exactitud el número de días del año con su combinación de temperatura máxima y mínima en el que se puede utilizar solo la VN para mantener las condiciones interiores por debajo de 26 °C y de esa forma prescindir de equipos de refrigeración. Además, en esta ocasión solo se simuló la VN abriendo las ventanas, pero no es lo mismo que si se hiciera con un equipo de ventilación para mover hacia dentro de la vivienda la mayor cantidad de aire cuando se pueda aprovechar dicha ventilación. Por lo tanto, se necesitaría estudiar los efectos de hacer la VN con un ventilador en vez de solo abrir las ventanas. Hasta se puede incluir la combinación con el efecto chimenea.

#### 9.5.3.8. Comportamiento de la vivienda en otra zona climática

Hasta ahora se mostraron los resultados del comportamiento térmico y energético con la vivienda ubicada en una localidad que pertenece a una severidad climática SCAO durante todo el año. Pero ¿cuáles serían los resultados de esa vivienda si estuviera situada en una localidad ubicada en otra zona climática?

En el capítulo 4 se concluyó que para el territorio dominicano se tienen dos zonas climáticas principales: severidad climática abril-octubre (SCAO) y severidad climática noviembre-marzo (SCliNM)), y que las localidades se distribuyen en aquellas que tienen una SCAO durante todo el año, las que tienen una severidad climática diferenciada o mixta y las que tienen SCliNM durante todo el año.

Aprovechando la flexibilidad y herramientas que ofrece *DesignBuilder* y creando las plantillas correspondientes como se explicó anteriormente, en esta sección se presentan los resultados obtenidos al tomar la vivienda y ubicarla en otras localidades con zonas climáticas diferentes. Se eligió una localidad con severidad climática mixta: La Vega. Y también se eligió una localidad con severidad climática noviembre-marzo (SCliNM) todo el año: Constanza.

9.5.3.8.1. Resultados en el caso de una localidad situada en una zona con severidad climática mixta.

La vivienda evaluada en la zona con severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año fue: "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°) del apartado 9.5.3.1. Se tomó esa misma vivienda, pero ahora ubicándola en una zona con severidad climática mixta. *DesignBuilder* permite "ubicar" una misma vivienda en diferentes zonas climáticas y de esa forma evaluar y comparar resultados. Para este caso, se ubicó la misma vivienda en la localidad "La Vega".

Igual que la evaluación hecha para el comportamiento térmico y energético en la localidad "Santo Domingo": se eligió el día más cálido registrado en el año típico (TMY). Dicho día más cálido, para La Vega, corresponde al 24 de agosto con temperatura de bulbo seco promedio de 25,96 °C como se describió en el apartado 9.5.3. De las tablas siguientes se obtienen la temperatura máxima de 31,85 °C y mínima del día de 22,13 °C.

Tabla 79. Temperatura máxima diaria del TMY para la localidad La Vega.

Temperatura máxima diaria (°C)												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	24,27	25,15	28,18	22,89	26,87	28,81	27,27	26,73	25,82	25,47	26,16	25,97
2	24,12	25,25	28,64	23,76	26,34	27,74	26,96	27,56	25,99	26,97	25,73	25,99
3	25,36	25,95	29,54	22,24	27,66	27,80	26,84	28,08	26,17	26,09	26,44	24,38
4	25,56	25,65	27,53	26,01	27,07	26,10	26,02	27,58	27,41	26,87	26,15	24,24
5	25,48	27,51	23,34	28,43	25,82	25,18	26,67	27,43	27,13	26,40	27,21	24,58
6	24,92	28,82	24,12	28,28	27,22	26,03	27,60	27,27	27,75	26,08	27,98	25,37
7	25,74	27,03	24,84	27,24	29,14	25,65	26,37	29,49	25,95	25,90	28,43	24,92
8	25,99	25,90	26,48	28,93	28,61	25,53	26,22	27,34	25,76	26,12	26,08	25,42
9	25,77	24,45	26,87	29,48	27,29	26,07	25,86	26,14	28,30	26,06	24,27	24,50
10	24,00	23,97	27,05	28,77	25,86	26,74	26,56	26,05	29,40	27,86	24,38	24,24
11	24,81	24,08	27,77	28,34	24,64	25,93	28,25	28,25	26,82	27,66	24,58	24,67
12	25,09	24,71	27,52	28,95	24,96	26,79	28,80	26,81	26,72	27,33	25,11	25,56
13	25,25	26,21	27,57	29,28	26,66	26,84	30,41	26,93	26,42	26,61	24,37	24,98
14	25,53	27,85	28,60	30,50	28,81	28,77	29,74	27,72	28,26	28,74	24,70	23,54
15	25,27	25,99	26,45	28,30	26,15	29,38	27,43	27,94	27,59	27,36	25,73	22,91
16	22,85	26,33	25,94	27,31	25,04	27,47	26,33	26,73	27,37	28,64	25,92	24,02
17	24,15	27,25	26,35	24,33	25,38	27,73	26,42	26,44	26,90	28,52	25,96	23,54
18	24,41	28,10	26,11	26,09	26,24	26,13	26,49	28,05	27,62	28,41	26,90	24,16
19	25,37	27,32	26,78	28,36	26,47	26,41	25,62	25,29	27,12	26,36	25,87	23,37
20	26,61	27,56	25,44	25,26	25,09	26,94	25,45	26,56	26,59	25,82	25,48	22,65
21	27,57	28,30	25,70	29,58	24,83	25,94	25,60	26,45	27,78	25,63	25,01	23,78
22	23,57	27,34	27,58	27,67	26,59	25,98	27,38	28,02	27,60	25,90	24,60	24,84
23	23,03	27,20	28,37	27,14	26,53	25,74	27,04	28,78	29,13	27,26	24,75	24,70
24	23,80	29,07	27,18	26,72	27,14	27,11	26,02	<b>31,85</b>	28,87	27,49	24,37	25,17
25	25,04	25,28	23,72	26,66	29,42	27,08	25,97	26,97	28,14	26,91	24,56	24,33
26	24,63	26,22	23,94	26,70	28,86	29,04	25,72	26,19	30,16	26,60	24,80	24,89
27	24,37	27,36	22,45	25,39	29,75	26,94	27,21	26,92	29,78	27,47	23,75	25,37
28	23,63	27,98	24,85	25,61	26,18	25,04	26,34	27,88	28,88	27,39	23,04	26,16
29	25,22		27,35	26,72	28,98	26,24	26,99	28,20	26,91	27,00	23,71	25,80
30	26,74		26,94	27,04	29,25	27,64	27,40	28,06	25,96	27,85	23,84	25,31
31	26,80		25,89		26,41		26,33	27,70		25,82		25,01

Tabla 80. Temperatura mínima diaria del TMY para la localidad La Vega.

Temperatura mínima diaria (°C)												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	16,08	19,54	19,61	18,82	19,86	20,04	22,15	22,27	22,68	22,31	21,38	19,68
2	15,30	18,55	19,66	18,70	20,58	20,45	22,32	21,38	21,87	21,82	21,02	19,43
3	17,10	19,85	21,55	18,46	20,39	20,97	22,19	21,87	21,47	21,83	20,99	18,82
4	19,53	20,05	20,91	18,57	19,91	21,36	21,52	21,96	21,53	21,86	21,32	19,11
5	19,93	17,38	18,88	18,34	20,84	21,47	21,77	22,23	22,53	21,56	21,85	18,91
6	19,41	18,92	18,93	18,13	19,76	21,54	21,69	21,87	22,30	22,04	21,47	19,10
7	19,56	21,13	19,28	18,09	18,31	21,42	21,89	22,58	22,36	22,19	21,42	19,09
8	17,73	16,57	19,77	17,80	21,38	21,11	22,16	22,02	21,75	21,83	21,65	20,09
9	17,38	16,14	20,09	17,97	20,66	20,86	22,30	22,62	21,00	22,38	20,94	20,53
10	18,62	14,40	19,21	18,69	20,80	20,31	21,94	22,69	20,47	21,53	20,50	20,24
11	18,55	16,07	17,10	17,67	21,25	21,52	22,04	22,50	21,95	22,35	21,34	19,97
12	17,82	16,38	17,60	16,61	21,35	21,39	20,94	23,09	21,67	22,70	20,20	19,56
13	17,91	16,34	18,85	18,39	20,54	21,16	21,24	22,92	22,43	22,39	20,17	19,76
14	17,11	16,94	17,65	17,65	20,26	20,63	21,27	22,73	21,81	21,59	20,97	19,23
15	18,17	19,59	19,99	20,25	21,35	21,43	21,41	22,54	22,31	22,42	20,82	18,36
16	18,66	19,57	19,77	20,55	21,16	21,14	21,39	22,08	23,33	21,07	21,59	17,74
17	18,52	19,40	19,39	20,46	21,24	21,33	21,97	22,43	23,28	20,06	21,65	17,87
18	19,00	19,85	19,74	20,33	20,94	21,62	21,62	22,18	22,14	20,94	21,07	18,31
19	18,67	18,26	19,47	19,76	20,33	21,96	21,94	21,83	23,31	21,15	20,73	18,29
20	19,45	18,87	19,95	19,56	21,29	21,27	22,69	22,32	23,16	21,30	20,68	18,42
21	19,17	17,93	20,19	18,84	21,07	20,41	22,87	22,66	22,64	21,13	20,40	17,91
22	18,99	19,51	20,72	20,49	21,18	21,67	21,55	23,12	22,67	21,67	20,53	18,71
23	19,07	19,53	20,56	22,07	21,11	22,83	20,31	23,16	22,03	21,70	20,01	18,98
24	19,04	18,70	19,66	20,49	20,78	21,74	22,43	<b>22,13</b>	22,30	20,99	19,37	18,97
25	19,13	17,17	21,43	19,51	19,89	21,41	22,27	21,72	22,52	20,38	19,06	19,01
26	19,05	16,16	20,77	19,45	20,60	21,01	22,52	21,66	20,82	19,21	19,23	18,55
27	18,94	16,55	20,09	18,95	20,08	21,39	21,96	22,95	21,65	19,92	19,51	18,03
28	18,67	18,95	19,98	19,96	20,96	21,60	22,05	23,20	22,79	20,47	19,12	18,15
29	18,17		19,25	20,54	21,10	21,65	21,82	22,52	21,63	20,63	19,84	18,68
30	18,13		20,17	20,79	19,88	20,85	22,62	22,75	21,76	20,19	19,90	19,71
31	17,04		18,92		20,84		23,13	22,41		20,14		18,30



De las tablas anteriores se puede obtener el número de los días que se encuentran en diferentes rangos de temperaturas. Realizando el conteo de los días en rango de 1 °C, en la tabla siguiente se muestran la cantidad de días y los porcentajes del año que representan para cada rango.

Tabla 81. Cantidad y porcentaje de días que pertenecen a cada rango de temperaturas.

Máx.			Mín.		
Rango de temp. (°C)	Total de días	Porcentaje	Rango de temp. (°C)	Total de días	Porcentaje
22-23	6	1,6 %	>=27	0	0,0 %
23-24	17	4,7 %	26-27	0	0,0 %
24-25	43	11,8 %	25-26	0	0,0 %
25-26	76	20,8 %	24-25	0	0,0 %
26-27	91	24,9 %	23-24	9	2,5 %
27-28	72	19,7 %	22-23	56	15,3 %
28-29	40	11,0 %	21-22	91	24,9 %
29-30	16	4,4 %	20-21	67	18,4 %
30-31	3	0,8 %	19-20	62	17,0 %
31-32	1	0,3 %	18-19	48	13,2 %
32-33	0	0,0 %	17-18	20	5,5 %
33-34	0	0,0 %	16-17	10	2,7 %
34-35	0	0,0 %	15-16	1	0,3 %
35-36	0	0,0 %	14-15	1	0,3 %
	365	100,0 %		365	100,0 %

Para mejor comprensión, en los gráficos siguientes se presentan los porcentajes que corresponden a cada rango de temperatura máxima y los porcentajes para las temperaturas mínimas.

Gráfico 29. Porcentajes de cada rango de temperaturas (°C) máxima.

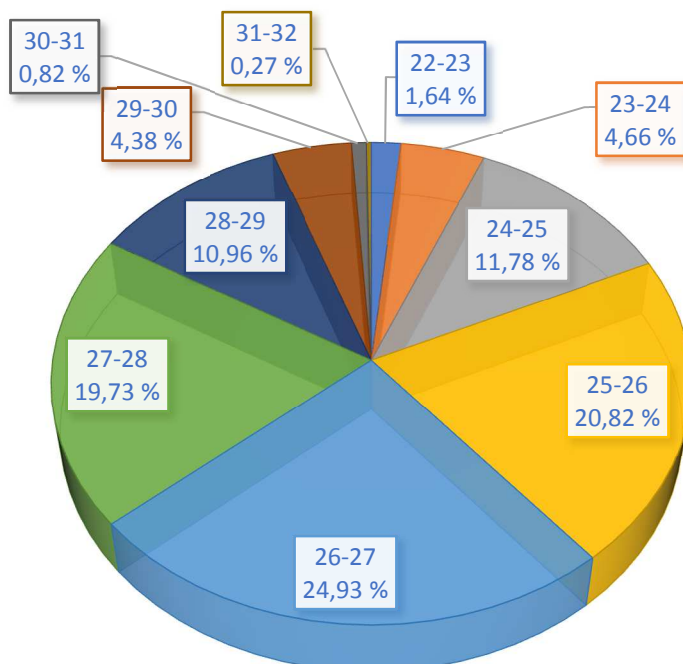
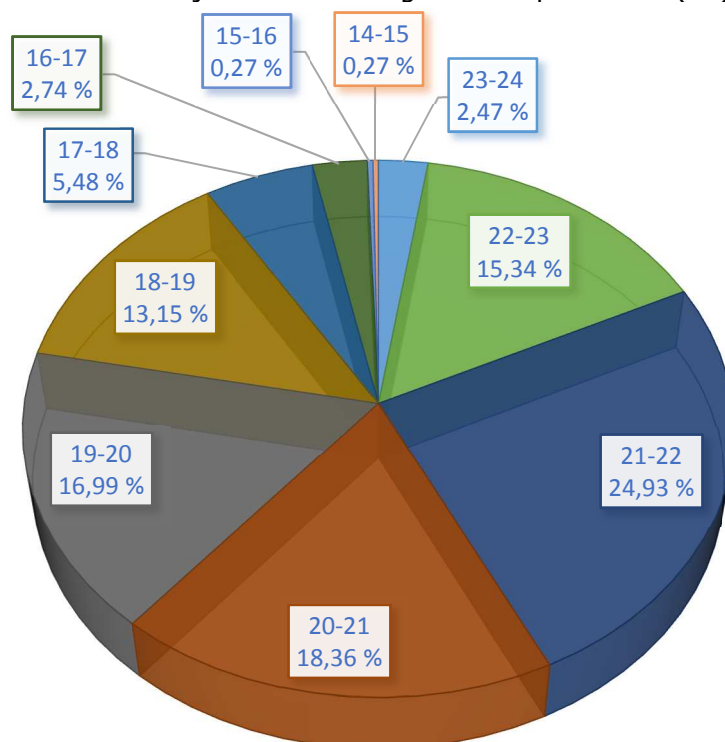


Gráfico 30. Porcentajes de cada rango de temperaturas (°C) mínima.



Con los datos climáticos anteriores de contexto, se presentan los resultados de la simulación realizada en la comunidad La Vega. Fueron realizadas las siguientes simulaciones:

1. La misma vivienda evaluada en la zona con severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año: "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°). Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "Actividad" estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1), en la pestaña "HVAC" sin refrigeración. Luego, para evaluar el consumo de energía entre las diferentes simulaciones, la configuración se cambió a: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "HVAC" con la refrigeración encendida ("On 24/7"), en la pestaña "Actividad" temperatura de consigna de 26 °C y estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1). La cual a partir de ahora será llamada "Simulación mixta 1".
2. La misma vivienda evaluada en la zona con severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año: "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°). Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo abierto (puertas y ventanas "On 24/7") como es la tradición. La cual a partir de ahora será llamada "Simulación mixta 2".

3. La misma vivienda evaluada en la zona con severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año: "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°). Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "Actividad" sin infiltraciones de aire, en la pestaña "HVAC" sin refrigeración. Luego, para evaluar el consumo de energía entre las diferentes simulaciones, la configuración se cambió a: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "HVAC" con la refrigeración encendida ("On 24/7"), en la pestaña "Actividad" temperatura de consigna de 26 °C y sin infiltración de aire. La cual a partir de ahora será llamada "Simulación mixta 3".

Tabla 82. Resultados de la simulación para la localidad La Vega

<b>Variación de la temperatura interior y el consumo energético</b>		
<b>Configuración</b>	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)
<b>Diseño 2</b>	30,08	69,8
<b>Simulación mixta 1</b>	26,89	13,92
<b>Simulación mixta 2</b>	26,31	
<b>Simulación mixta 3</b>	26,99	6,83

los valores de "diseño 2" (fondo rojo) se presentan en esta tabla para que se pueda ver mejor la comparación de la misma vivienda solo cambiando la localidad ("Simulación mixta 1"). Los resultados muestran que el solo hecho de cambio de zona climática supone una reducción en la temperatura interior de 3,19 °C (10,61 %). En cuanto a la reducción al consumo de energía la reducción es de 55,88 kWh (80,01 %). Para esta amplia diferencia en el consumo energético es bueno recordar las condiciones climáticas para el día más cálido entre ambas zonas climáticas:

- Santo Domingo, zona climática V4V4 con severidad climática abril-octubre todo el año, temperatura de bulbo seco promedio de 29,39 °C, máxima de 34,21 °C y mínima de 26,4 °C.
- La Vega, zona climática V1V3 con severidad climática mixta, temperatura de bulbo seco promedio de 25,96 °C, máxima de 31,85 °C y mínima del día de 22,13 °C.

Estas diferencias climáticas tienen un gran impacto. Mientras que la "Simulación mixta 3" que fue simulada sin tomar en cuenta la infiltración refleja que el solo hecho de controlar la infiltración supone una reducción en el consumo de energía de 7,09 kWh (50,93 %). Esta reducción es muy parecida a la obtenida en la localidad Santo Domingo que fue de 47,9 %.

Al igual que en la localidad Santo Domingo, fueron realizadas diversas simulaciones considerando la posición de las placas tanto en los muros como en las cubiertas así como la ventilación natural (VN). Pero aquí solo se presentan los resultados con la combinación más favorable.

En la tabla siguiente se presentan los resultados de la "Simulación III" (del apartado 9.5.3.2) con las "placas aislantes mejoradas" del apartado 9.5.3.4, más la cámara de aire, colocadas solo en la cara interior tanto en los muros exteriores como en la cubierta. Además, aprovechando la ventilación natural (VN). Factor U del muro ( $W/m^2 \cdot K$ ): con película 0,507 y sin película 0,548. Factor U de la cubierta ( $W/m^2 \cdot K$ ): con película 0,544 y sin película 0,588.

La ventilación natural (VN) se emplea con las ventanas abiertas siempre y cuando las temperaturas exteriores se registren por debajo de los 26 °C que para el día 24 de agosto corresponden a las horas que van desde las 0:30 hasta las 9:30, luego desde las 20 h hasta la 0 h y para el día 23 de septiembre corresponden a las horas que van desde las 0:30 hasta las 10:00, luego desde las 18:30 hasta la 0 h. Las ventanas se cierran en las horas que la temperatura exterior se registre por encima de los 26 °C. Los resultados se presentan para el día más cálido (24 de agosto) y para el 23 de septiembre.

Tabla 83. Simulación III con las placas aislantes, cámara de aire y capa de papel colocadas solo en el lado interior tanto en los muros exteriores como en la cubierta.

Fecha/Hora	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Temperatura
	Ext. BS, °C	interior, °C	Ext. BS, °C	interior, °C
	24 de agosto		23 de septiembre	
<b>0:30</b>	23,05	24,89	22,80	24,79
<b>1:00</b>	23,00	24,81	22,60	24,58
<b>1:30</b>	22,85	24,77	22,55	24,51
<b>2:00</b>	22,70	24,74	22,50	24,45
<b>2:30</b>	22,70	24,68	22,40	24,39
<b>3:00</b>	22,70	24,56	22,30	24,31
<b>3:30</b>	22,65	24,52	22,20	24,25
<b>4:00</b>	22,60	24,49	22,10	24,17
<b>4:30</b>	22,50	24,48	22,10	24,10
<b>5:00</b>	22,40	24,42	22,10	24,05
<b>5:30</b>	22,30	24,38	22,10	23,99
<b>6:00</b>	22,20	24,30	22,10	23,93
<b>6:30</b>	22,15	24,24	22,05	23,89
<b>7:00</b>	22,10	24,20	22,00	23,88
<b>7:30</b>	22,60	24,22	22,25	23,89
<b>8:00</b>	23,10	24,43	22,50	24,00
<b>8:30</b>	23,95	24,63	23,15	24,20
<b>9:00</b>	24,80	24,93	23,80	24,38
<b>9:30</b>	25,80	25,10	24,55	24,71
<b>10:00</b>	26,80	25,15	25,30	24,99
<b>10:30</b>	27,80	25,15	26,05	25,03
<b>11:00</b>	28,80	25,18	26,80	25,03
<b>11:30</b>	29,60	25,20	27,30	25,03
<b>12:00</b>	30,40	25,24	27,80	25,04
<b>12:30</b>	30,90	25,29	28,15	25,05
<b>13:00</b>	31,40	25,34	28,50	25,08

<b>13:30</b>	31,65	25,38	28,80	25,10
<b>14:00</b>	31,90	25,46	29,10	25,16
<b>14:30</b>	31,80	25,54	29,10	25,24
<b>15:00</b>	31,70	25,62	29,10	25,30
<b>15:30</b>	31,40	25,70	28,95	25,37
<b>16:00</b>	31,10	25,77	28,80	25,43
<b>16:30</b>	30,55	25,84	28,35	25,54
<b>17:00</b>	30,00	25,89	27,90	25,62
<b>17:30</b>	29,20	25,95	27,35	25,67
<b>18:00</b>	28,40	26,02	26,80	25,73
<b>18:30</b>	27,60	26,04	25,90	25,75
<b>19:00</b>	26,80	26,04	25,00	25,69
<b>19:30</b>	26,10	26,05	24,60	25,62
<b>20:00</b>	25,40	26,04	24,20	25,48
<b>20:30</b>	24,95	25,83	23,95	25,38
<b>21:00</b>	24,50	25,56	23,70	25,28
<b>21:30</b>	24,15	25,42	23,50	25,23
<b>22:00</b>	23,80	25,28	23,30	25,15
<b>22:30</b>	23,55	25,17	23,15	25,04
<b>23:00</b>	23,30	25,10	23,00	24,99
<b>23:30</b>	23,20	25,07	23,00	24,94
<b>0:00</b>	23,10	25,11	23,00	24,89
<b>Promedios</b>	25,96	25,15	24,76	24,86

Los resultados muestran que para el día 24 de agosto con una temperatura de bulbo seco interior máxima de 26,05 °C hay dos horas que la temperatura interior supera por centésimas los 26 °C que tenemos como temperatura de confort, mientras que para el día 23 de septiembre la temperatura interior se mantiene las 24 horas por debajo de 26 °C (máxima interior 25,75 °C).

La decisión de mostrar los resultados para el 24 de agosto y 23 de septiembre es porque según los datos climáticos registrados para la localidad La Vega solo un día (0,3 %) del año típico se encuentra con temperatura de bulbo seco máxima en el rango 31 °C-32 °C, mientras que todos los demás días se encuentran por debajo. Mientras que el 23 de septiembre con temperatura de bulbo seco máxima de 29,13 °C y mínima de 22,03 °C es representativo de todos los demás días del año típico. Lo que indica que con este diseño constructivo se puede mantener la temperatura interior por debajo de los 26 °C en todos los días del año excepto uno.

Ahora bien, aunque para el día 24 de agosto se pueden leer valores de 26,02 °C, 26,04 °C, 26,04 °C, 26,05 °C y 26,04 °C en la temperatura interior (desde las 18 h hasta las 20 h), pero en la simulación con el equipo de refrigeración encendido da como resultado 0 kWh de consumo, por lo que parece ser que el *software* no toma en cuenta la segunda cifra decimal.

Por lo tanto, se puede concluir que para la localidad La Vega, comunidad que pertenece a una zona climática con severidad climática mixta, se puede mantener

la vivienda con temperatura interior dentro de la zona de confort y sin consumo energético para refrigeración aún en su día más severo según el año típico (TMY), controlando las infiltraciones, aprovechando la ventilación natural (VN) y utilizando solamente las placas mejoradas más la cámara de aire en la parte interior tanto de la cubierta como de los muros exteriores.

9.5.3.8.2. Resultados en el caso de una localidad situada en una zona con severidad climática SCLiNM durante todo el año.

La vivienda evaluada en la zona con severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año fue: "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315º) del apartado 9.5.3.1. Se tomó esa misma vivienda, pero ahora ubicándola en una zona con severidad climática noviembre-marzo (SCLiNM) durante todo el año. *DesignBuilder* permite "ubicar" una misma vivienda en diferentes zonas climáticas y de esa forma evaluar y comparar resultados. Para este caso, se ubicó la misma vivienda pero en la localidad "Constanza".

Igual que la evaluación hecha para el comportamiento térmico y energético en la localidad Santo Domingo: se eligió el día más cálido registrado en el año típico. Dicho día más cálido, para Constanza, corresponde al 24 de agosto con temperatura de bulbo seco promedio de 24,75 °C como se describió en el apartado 9.5.3. De las tablas siguientes se obtienen la temperatura máxima de 29,85 °C y mínima del día de 21,43 °C.

Tabla 84. Temperatura máxima diaria del TMY para la localidad Constanza.

Temperatura máxima diaria (°C)												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	23,00	23,30	25,07	25,94	24,84	25,28	25,23	25,79	25,78	24,33	25,38	23,77
2	22,85	24,16	24,52	24,78	24,79	27,18	25,99	26,00	26,74	25,73	24,95	23,55
3	24,05	23,84	24,89	26,92	24,66	26,68	25,80	26,94	24,40	25,09	25,18	22,70
4	24,33	23,10	26,33	26,97	25,17	25,08	24,53	26,52	23,56	25,72	24,26	22,25
5	24,32	23,76	24,09	26,41	26,01	25,33	25,13	26,33	24,44	25,38	25,20	23,41
6	23,40	24,73	23,51	26,71	26,04	25,49	26,12	26,06	25,68	25,25	25,98	23,52
7	23,60	24,31	25,63	27,32	25,57	26,43	24,98	27,54	25,38	24,98	26,74	23,60
8	23,96	25,80	22,90	27,68	24,34	25,30	25,03	26,64	25,53	25,28	25,16	23,19
9	24,31	24,46	23,45	25,89	26,43	25,17	24,68	25,18	26,01	24,90	23,53	23,45
10	22,97	25,00	24,41	26,56	26,81	25,33	25,73	24,84	25,47	26,61	23,53	24,04
11	23,10	24,74	25,04	25,96	24,14	24,68	26,21	27,07	26,86	26,92	23,85	24,13
12	23,21	23,77	25,43	27,33	23,30	24,76	26,67	25,49	24,07	27,00	23,55	24,81
13	23,41	25,48	23,50	26,64	24,88	24,54	27,82	25,99	25,18	26,07	23,36	24,99
14	23,96	24,37	24,13	26,19	24,85	24,97	27,41	26,89	25,26	26,98	23,35	22,36
15	23,72	25,70	25,58	26,77	25,32	24,92	25,89	26,64	24,64	26,22	24,49	22,31
16	22,14	24,17	26,51	26,25	24,21	25,12	25,17	25,99	24,66	26,88	24,94	24,03
17	22,82	23,52	26,79	28,03	23,98	23,85	24,90	25,38	23,32	26,87	24,31	23,81
18	23,88	22,49	26,00	25,40	24,43	24,18	25,66	26,57	25,49	26,81	24,95	23,63
19	23,49	23,45	25,71	24,20	24,48	24,93	24,43	24,42	24,99	25,57	24,38	23,80
20	24,27	22,95	26,07	25,80	23,74	23,83	24,72	25,75	26,30	25,04	24,12	24,55
21	26,86	23,55	26,90	26,98	24,79	24,48	24,64	25,79	26,71	25,03	23,94	24,37
22	23,34	24,93	27,83	25,97	23,79	25,09	25,90	26,23	26,34	25,15	23,50	25,45
23	23,02	25,60	27,42	26,27	23,34	25,46	26,05	26,74	24,02	26,74	23,59	23,48
24	23,10	24,04	27,03	25,12	24,98	25,30	24,89	29,85	25,24	25,87	23,10	24,31
25	23,80	24,58	27,22	24,57	25,32	26,09	24,97	25,50	27,27	25,66	23,31	23,13
26	23,09	24,13	25,35	24,64	26,31	26,11	24,97	24,56	27,99	25,29	23,16	23,88
27	22,95	24,46	25,74	24,85	26,12	25,41	25,87	26,13	27,12	26,30	22,68	25,06
28	22,77	24,27	23,79	24,65	26,23	24,84	25,45	27,25	27,89	26,15	22,33	23,47
29	23,45		23,64	24,20	26,67	24,38	25,85	26,81	26,61	25,73	23,05	23,71
30	25,09		23,17	23,20	26,14	24,98	26,45	26,26	25,95	26,02	23,06	25,78
31	25,36		24,22		23,81		25,10	26,59		24,88		24,25

Tabla 85. Temperatura mínima diaria del TMY para la localidad Constanza.

Temperatura mínima diaria (°C)												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	14,48	17,43	16,67	17,46	19,86	20,68	21,17	20,97	20,98	20,94	20,37	17,81
2	14,04	17,19	17,06	17,40	19,64	20,22	21,01	20,35	21,46	20,33	19,85	17,48
3	16,16	16,85	17,18	16,55	20,44	20,13	20,72	20,78	21,58	20,31	19,95	15,54
4	18,17	15,41	18,72	16,77	19,97	20,74	20,28	20,86	20,16	20,33	20,25	17,26
5	18,71	16,40	17,00	16,92	20,65	20,45	20,79	20,92	19,86	20,01	20,79	17,85
6	18,24	17,95	16,23	16,94	20,25	20,98	20,59	20,73	20,83	20,49	21,18	17,65
7	18,16	17,98	15,48	17,95	19,08	21,25	20,48	21,43	21,12	20,92	20,62	18,42
8	16,82	17,20	14,69	19,66	18,81	21,22	20,82	20,78	21,97	20,48	20,33	18,11
9	16,32	17,19	13,15	18,44	17,71	20,98	21,08	21,28	21,45	21,62	19,83	17,06
10	17,27	17,27	12,87	17,16	17,59	20,62	20,22	21,33	21,59	20,76	19,39	17,13
11	17,19	17,01	14,09	17,97	17,81	20,41	20,93	21,39	21,31	21,29	19,86	16,83
12	16,37	18,11	15,98	17,35	19,15	19,86	19,96	21,63	21,88	21,90	18,57	18,79
13	16,63	17,77	16,71	16,91	19,37	20,01	20,23	21,62	20,30	21,62	18,57	18,98
14	15,93	18,12	16,74	17,42	19,13	20,35	20,45	21,64	20,37	20,68	19,50	18,05
15	17,18	17,47	18,24	17,62	20,38	20,43	20,28	21,42	21,23	21,60	19,77	18,04
16	17,20	18,06	17,37	18,31	20,21	19,82	20,29	20,91	21,12	19,95	20,12	17,95
17	17,11	17,10	16,79	18,88	19,81	20,02	20,97	21,34	20,57	19,00	20,28	18,41
18	17,68	17,15	18,05	18,21	18,89	19,90	20,17	20,92	20,47	19,62	19,73	17,46
19	17,90	16,69	18,07	17,41	18,46	19,68	20,34	20,39	21,06	19,86	19,44	17,69
20	18,60	16,36	17,23	16,85	20,24	20,21	21,13	21,14	21,74	20,13	19,41	16,88
21	18,88	15,31	16,02	18,58	19,93	20,63	21,53	21,24	20,78	19,42	18,96	18,83
22	17,80	15,85	15,55	19,78	19,70	20,63	19,82	22,05	22,66	20,88	19,11	18,56
23	17,79	14,93	17,43	18,10	19,66	20,77	18,62	22,16	21,87	20,82	18,76	18,08
24	17,69	15,27	18,49	17,25	19,83	20,99	21,20	<b>21,43</b>	22,06	19,99	18,07	17,39
25	17,72	14,47	19,58	17,39	20,61	20,18	21,15	20,81	20,83	19,33	17,82	17,26
26	17,51	15,48	20,13	17,97	20,26	20,44	21,32	20,79	19,64	18,32	18,00	17,54
27	17,61	15,16	20,04	17,62	20,57	20,43	20,60	21,62	20,38	18,32	18,24	18,07
28	17,26	16,06	18,86	17,22	20,41	20,03	20,94	21,62	19,72	18,83	17,82	18,09
29	17,11		18,56	17,91	20,20	19,93	20,56	21,71	21,13	19,21	18,44	18,06
30	17,00		17,77	17,32	20,11	20,02	21,32	21,86	20,74	18,94	18,54	18,69
31	16,27		17,14		20,26		21,81	21,00		19,00		17,03



De las tablas anteriores se puede obtener el número de los días que se encuentran en diferentes rangos de temperaturas. Realizando el conteo de los días en rango de 1 °C, en la tabla siguiente se muestran la cantidad de días y los porcentajes del año que representan para cada rango.

Tabla 86. Cantidad y porcentaje de días que pertenecen a cada rango de temperaturas.

<b>Máxima</b>			<b>Mínima</b>		
<b>Rango de temp. (°C)</b>	<b>Total de días</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Rango de temp. (°C)</b>	<b>Total de días</b>	<b>Porcentaje</b>
22-23	16	4,4 %	>=27	0	0,0 %
23-24	70	19,2 %	26-27	0	0,0 %
24-25	96	26,3 %	25-26	0	0,0 %
25-26	94	25,8 %	24-25	0	0,0 %
26-27	69	18,9 %	23-24	0	0,0 %
27-28	18	4,9 %	22-23	4	1,1 %
28-29	1	0,3 %	21-22	49	13,4 %
29-30	1	0,3 %	20-21	99	27,1 %
30-31	0	0,0 %	19-20	44	12,1 %
31-32	0	0,0 %	18-19	53	14,5 %
32-33	0	0,0 %	17-18	72	19,7 %
33-34	0	0,0 %	16-17	25	6,8 %
34-35	0	0,0 %	15-16	11	3,0 %
35-36	0	0,0 %	14-15	6	1,6 %
			13-14	1	0,3 %
			12-13	1	0,3 %
	<b>365</b>	<b>100,0 %</b>		<b>365</b>	<b>100,0 %</b>

Para mejor comprensión, en los gráficos siguientes se presentan los porcentajes que corresponden a cada rango de temperatura máxima y los porcentajes para las temperaturas mínimas.

Gráfico 31. Porcentajes de cada rango de temperaturas (°C) máxima.

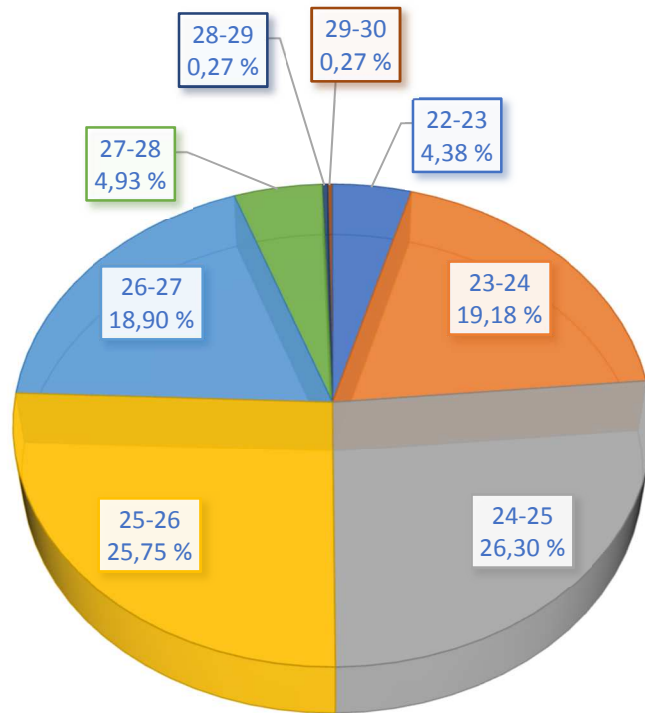
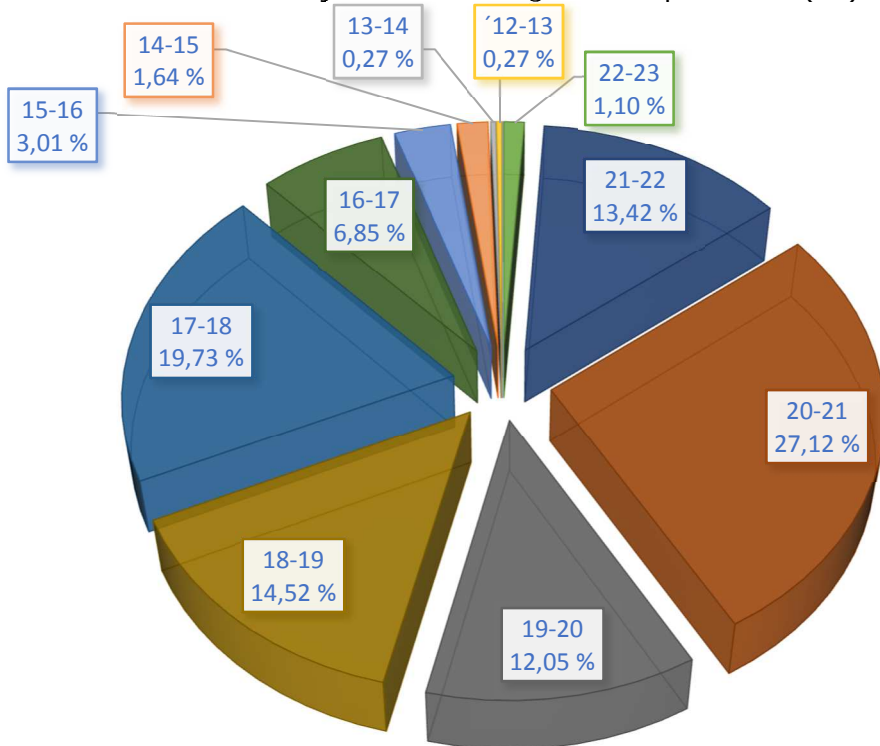


Gráfico 32. Porcentajes de cada rango de temperaturas (°C) mínima.



Con los datos climáticos anteriores de contexto, se presentan los resultados de la simulación realizada en la comunidad "Constanza". Fueron realizadas las siguientes simulaciones:

1. La misma vivienda evaluada en la zona con severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año: "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°). Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "Actividad" estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1), en la pestaña "HVAC" sin refrigeración. Luego, para evaluar el consumo de energía entre las diferentes simulaciones, la configuración se cambió a: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "HVAC" con la refrigeración encendida ("On 24/7"), en la pestaña "Actividad" temperatura de consigna de 26 °C y estanqueidad muy pobre según el ensayo real (E1). La cual a partir de ahora será llamada "Simulación SCLiNM 1".
2. La misma vivienda evaluada en la zona con severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año: "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°). Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo abierto (puertas y ventanas "On 24/7") como es la tradición. La cual a partir de ahora será llamada "Simulación SCLiNM 2".
3. La misma vivienda evaluada en la zona con severidad climática abril-octubre (SCAO) durante todo el año: "diseño 2" (2. Casa pareada cuyo patio tiene muro de cierre y orientada hacia el noroeste NO, 315°). Para evaluar la temperatura de bulbo seco interior la simulación fue realizada primero con los siguientes parámetros particularizados: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "Actividad" sin infiltraciones de aire, en la pestaña "HVAC" sin refrigeración. Luego, para evaluar el consumo de energía entre las diferentes simulaciones, la configuración se cambió a: en la pestaña "Aberturas", de la "Pantalla de edición", todo cerrado (puertas y ventanas "Off 24/7"), en la pestaña "HVAC" con la refrigeración encendida ("On 24/7"), en la pestaña "Actividad" temperatura de consigna de 26 °C y sin infiltración de aire. La cual a partir de ahora será llamada "Simulación SCLiNM 3".

Tabla 87. Resultados de la simulación para la localidad Constanza.

<b>Variación de la temperatura interior y el consumo energético</b>		
<b>Configuración</b>	Temp. Int. Media (°C)	Consumo energía (kWh)
<b>Diseño 2</b>	<b>30,08</b>	<b>69,8</b>
<b>Simulación SCLiNM 1</b>	25,71	2,17
<b>Simulación SCLiNM 2</b>	25,26	
<b>Simulación SCLiNM 3</b>	25,81	1,79

Los valores "diseño 2" (fondo rojo) se presentan en esta tabla para que se pueda ver mejor la comparación de la misma vivienda solo cambiando la localidad ("Simulación SCLiNM 1"). Los resultados muestran que el solo hecho de cambio de zona climática supone una reducción en la temperatura interior de 4,37 °C (14,53 %). En cuanto a la reducción del consumo de energía la reducción es de 67,63 kWh (96,89 %). Para esta amplia diferencia en el consumo energético es bueno recordar las condiciones climáticas para el día más cálido entre ambas zonas climáticas:

- Santo Domingo, zona climática V4V4 con severidad climática abril-octubre todo el año, temperatura de bulbo seco promedio de 29,39 °C, máxima de 34.21 °C y mínima del día de 26,4 °C.
- Constanza, zona climática V1V2 con severidad climática noviembre-marzo todo el año, temperatura de bulbo seco promedio de 24,75 °C, máxima de 29,85 °C y mínima del día de 21,43 °C.

Estas diferencias climáticas evidentemente tienen un gran impacto. La "Simulación SCLiNM 3" fue simulada sin tomar en cuenta la infiltración, este hecho refleja que con solo controlar la infiltración supone una reducción de 0,38 kWh (17,51 %).

A diferencia que en la localidad Santo Domingo y La Vega, donde fueron realizadas diversas simulaciones considerando la posición de las placas tanto en los muros como en las cubiertas así como la ventilación natural (VN). Pero aquí, Constanza, solo fue necesario hacer simulaciones con la ventilación natural (VN).

En la tabla siguiente se presentan los resultados de la "Simulación SCLiNM 3" aprovechando la VN. La ventilación natural (VN) se emplea con las ventanas abiertas siempre y cuando las temperaturas exteriores se registren por debajo de los 26 °C que para el día 24 de agosto corresponden a las horas que van desde las 0:30 hasta las 9:30, luego desde las 18:30 hasta la 0 h. También se presentan los resultados combinando la VN con el equipo de refrigeración.

Tabla 88. "Simulación SCLiNM 3" aprovechando la ventilación natural (VN).

Fecha/Hora	Temperatura Ext. BS	Temperatura interior	Temperatura Ext. BS	Temperatura interior
	°C	°C	°C	°C
	24 de agosto VN		24 de agosto VN+refrig.	
<b>0:30</b>	21,95	25,16	21,95	25,15
<b>1:00</b>	22,00	25,10	22,00	25,09
<b>1:30</b>	21,90	25,02	21,90	25,01
<b>2:00</b>	21,80	24,96	21,80	24,95
<b>2:30</b>	21,85	24,86	21,85	24,85
<b>3:00</b>	21,90	24,70	21,90	24,69
<b>3:30</b>	21,85	24,62	21,85	24,63
<b>4:00</b>	21,80	24,58	21,80	24,58
<b>4:30</b>	21,75	24,55	21,75	24,49
<b>5:00</b>	21,70	24,45	21,70	24,44
<b>5:30</b>	21,65	24,34	21,65	24,31
<b>6:00</b>	21,60	24,27	21,60	24,22
<b>6:30</b>	21,50	24,13	21,50	24,15
<b>7:00</b>	21,40	24,04	21,40	24,06
<b>7:30</b>	21,80	24,05	21,80	24,05
<b>8:00</b>	22,20	24,14	22,20	24,13
<b>8:30</b>	22,85	24,22	22,85	24,21
<b>9:00</b>	23,50	24,39	23,50	24,38
<b>9:30</b>	24,35	24,49	24,35	24,48
<b>10:00</b>	25,20	24,53	25,20	24,52
<b>10:30</b>	26,15	24,56	26,15	24,55
<b>11:00</b>	27,10	24,60	27,10	24,59
<b>11:30</b>	27,85	24,66	27,85	24,65
<b>12:00</b>	28,60	24,76	28,60	24,75
<b>12:30</b>	29,05	24,83	29,05	24,82
<b>13:00</b>	29,50	24,98	29,50	24,98
<b>13:30</b>	29,70	25,15	29,70	25,14
<b>14:00</b>	29,90	25,31	29,90	25,30
<b>14:30</b>	29,85	25,48	29,85	25,47
<b>15:00</b>	29,80	25,65	29,80	25,65
<b>15:30</b>	29,55	25,82	29,55	25,82
<b>16:00</b>	29,30	26,00	29,30	25,99
<b>16:30</b>	28,85	26,11	28,85	26,06
<b>17:00</b>	28,40	26,29	28,40	26,22
<b>17:30</b>	27,80	26,44	27,80	26,37
<b>18:00</b>	27,20	26,57	27,20	26,48
<b>18:30</b>	26,60	26,66	26,60	26,57
<b>19:00</b>	26,00	26,63	26,00	26,58
<b>19:30</b>	25,40	26,54	25,40	26,48
<b>20:00</b>	24,80	26,40	24,80	26,35

<b>20:30</b>	24,25	26,29	24,25	26,25
<b>21:00</b>	23,70	26,08	23,70	26,06
<b>21:30</b>	23,25	25,92	23,25	25,90
<b>22:00</b>	22,80	25,73	22,80	25,72
<b>22:30</b>	22,45	25,57	22,45	25,56
<b>23:00</b>	22,10	25,40	22,10	25,39
<b>23:30</b>	22,00	25,37	22,00	25,36
<b>0:00</b>	21,90	25,40	21,90	25,39
<b>Promedios</b>	<b>24,76</b>	<b>25,20</b>	<b>24,76</b>	<b>25,18</b>

De estos resultados se extrae lo siguiente: cuando se utiliza solamente la ventilación natural (VN) se registra una temperatura interior máxima de 26,66 °C. Pero aún con equipo de refrigeración activado se puede ver que la temperatura interior máxima solo se reduce a 26,58 °C y para dicha reducción consume 0,08 kWh. Esto parece indicar que, para este caso, el equipo de refrigeración solo funciona cuando la temperatura interior sube por encima de 26,5 °C (ejemplo: 26,6 °C y así), a pesar de que la temperatura de consigna introducida en *DesignBuilder* fue de 26 °C.

En la tabla siguiente se presentan los resultados de la "Simulación SCLiNM 1", con la estanqueidad muy pobre, y aprovechando solamente la VN para el día 17 de abril. Recordando que la VN se emplea con las ventanas abiertas siempre y cuando las temperaturas exteriores se registren por debajo de los 26 °C. Para el día 17 de abril corresponden a las horas que van desde las 0:30 hasta las 11:00, luego desde las 17:00 hasta la 0 h. Las ventanas se cierran en las horas que la temperatura exterior se registre por encima de los 26 °C.

Tabla 89. "Simulación SCLiNM 1" para el 17 de abril aprovechando la VN.

Fecha/Hora	Temperatura Ext. BS	Temperatura interior
	°C	°C
	<b>17 de abril</b>	
<b>0:30</b>	19,90	23,57
<b>1:00</b>	20,70	23,71
<b>1:30</b>	20,35	23,65
<b>2:00</b>	20,00	23,46
<b>2:30</b>	19,75	23,31
<b>3:00</b>	19,50	23,15
<b>3:30</b>	19,30	23,03
<b>4:00</b>	19,10	22,89
<b>4:30</b>	19,00	22,77
<b>5:00</b>	18,90	22,67
<b>5:30</b>	19,20	22,61
<b>6:00</b>	19,50	22,60
<b>6:30</b>	19,35	22,48
<b>7:00</b>	19,20	22,42
<b>7:30</b>	19,10	22,33

<b>8:00</b>	19,00	22,28
<b>8:30</b>	19,90	22,41
<b>9:00</b>	20,80	22,70
<b>9:30</b>	22,05	22,90
<b>10:00</b>	23,30	23,19
<b>10:30</b>	24,50	23,39
<b>11:00</b>	25,70	23,81
<b>11:30</b>	26,35	23,74
<b>12:00</b>	27,00	23,90
<b>12:30</b>	27,40	24,02
<b>13:00</b>	27,80	24,26
<b>13:30</b>	27,90	24,46
<b>14:00</b>	28,00	24,64
<b>14:30</b>	27,80	24,80
<b>15:00</b>	27,60	24,93
<b>15:30</b>	27,10	25,03
<b>16:00</b>	26,60	25,13
<b>16:30</b>	26,25	25,22
<b>17:00</b>	25,90	25,34
<b>17:30</b>	25,55	25,51
<b>18:00</b>	25,20	25,55
<b>18:30</b>	24,15	25,45
<b>19:00</b>	23,10	25,25
<b>19:30</b>	22,65	25,14
<b>20:00</b>	22,20	24,93
<b>20:30</b>	21,50	24,75
<b>21:00</b>	20,80	24,43
<b>21:30</b>	20,35	24,31
<b>22:00</b>	19,90	24,05
<b>22:30</b>	19,65	23,87
<b>23:00</b>	19,40	23,70
<b>23:30</b>	19,25	23,60
<b>0:00</b>	19,10	23,52
<b>Promedios</b>	22,43	23,85

Los resultados muestran que para el día 24 de agosto (más cálido) con una temperatura de bulbo seco interior máxima de 26,66 °C y 26,58 °C con refrigeración, hay algunas horas que la temperatura interior supera los 26 °C que tenemos como temperatura de confort, mientras que para el día 17 de abril la temperatura interior se mantiene las 24 horas por debajo de 26 °C (máxima interior 25,55 °C).

La decisión de mostrar los resultados para el 24 de agosto y 17 de abril es porque según los datos climáticos registrados para la localidad Constanza solo un día (0.3 %) del año típico se encuentra con temperatura de bulbo seco máxima en el rango 29 °C-30 °C, mientras que todos los demás días se encuentran por

debajo. Mientras que el 17 de abril con temperatura de bulbo seco máxima de 28,03 °C y mínima de 18,88 °C es representativo de todos los demás días del año típico. Lo que indica que aún con las infiltraciones propias de la edificación original y aprovechando la VN se puede mantener la temperatura interior por debajo de los 26 °C en todos los días del año excepto uno.

En vista de que en la localidad Constanza se registran temperaturas mínimas de hasta 12,87 °C, se realizaron simulaciones para ver el comportamiento de la vivienda en el día más frío: 9 de marzo con temperatura de bulbo seco promedio de 17,05 °C, temperatura máxima de 23,45 °C y temperatura mínima de 13,15 °C. En la tabla siguiente se presentan los resultados de la simulación con las infiltraciones propias de la vivienda y con las ventanas abiertas solo desde las 12 h hasta las 16:30 ensayada para el día más frío.

Tabla 90. "Simulación SCLiNM 1" para el día más frío de la localidad Constanza.

Fecha/Hora	Temperatura Ext. BS	Temperatura interior
	°C	°C
	<b>9 de marzo</b>	
<b>0:30</b>	13,75	20,83
<b>1:00</b>	14,40	20,59
<b>1:30</b>	14,25	20,47
<b>2:00</b>	14,10	20,39
<b>2:30</b>	14,00	20,29
<b>3:00</b>	13,90	20,20
<b>3:30</b>	13,85	20,10
<b>4:00</b>	13,80	20,01
<b>4:30</b>	13,75	19,92
<b>5:00</b>	13,70	19,85
<b>5:30</b>	13,65	19,76
<b>6:00</b>	13,60	19,68
<b>6:30</b>	13,60	19,60
<b>7:00</b>	13,60	19,53
<b>7:30</b>	14,00	19,50
<b>8:00</b>	14,40	19,59
<b>8:30</b>	15,15	19,66
<b>9:00</b>	15,90	19,81
<b>9:30</b>	16,70	19,98
<b>10:00</b>	17,50	20,14
<b>10:30</b>	18,40	20,29
<b>11:00</b>	19,30	20,42
<b>11:30</b>	20,20	20,54
<b>12:00</b>	21,10	20,70
<b>12:30</b>	21,80	21,13
<b>13:00</b>	22,50	21,46
<b>13:30</b>	22,90	21,61
<b>14:00</b>	23,30	21,93



<b>14:30</b>	23,40	22,15
<b>15:00</b>	23,50	22,33
<b>15:30</b>	23,25	22,43
<b>16:00</b>	23,00	22,51
<b>16:30</b>	22,50	22,47
<b>17:00</b>	22,00	22,54
<b>17:30</b>	21,10	22,61
<b>18:00</b>	20,20	22,66
<b>18:30</b>	18,95	22,63
<b>19:00</b>	17,70	22,46
<b>19:30</b>	16,90	22,34
<b>20:00</b>	16,10	22,09
<b>20:30</b>	15,55	21,99
<b>21:00</b>	15,00	21,77
<b>21:30</b>	14,55	21,60
<b>22:00</b>	14,10	21,44
<b>22:30</b>	13,80	21,35
<b>23:00</b>	13,50	21,16
<b>23:30</b>	13,30	21,01
<b>0:00</b>	13,10	20,92
<b>Promedios</b>	17,05	21,01

En la tabla anterior se puede ver que la temperatura mínima registrada en el interior de la vivienda es de 19,50 °C.

Por lo tanto, se puede concluir que para la localidad Constanza, comunidad que pertenece a una zona climática con severidad climática noviembre-marzo (SCliNM) durante todo el año, se puede mantener la vivienda con temperatura interior dentro de la zona confort y sin consumo energético para refrigeración en 364 de los 365 días del año típico (TMY) solamente aprovechando la ventilación natural (VN).

#### 9.5.4. Simulaciones referidas al amortiguamiento, desfase y voto medio previsto

En esta sección se discuten los resultados de simulaciones anteriores referidas al amortiguamiento y desfase de la onda térmica exterior con respecto a la onda térmica interior.

En la sección 6.3.3 se desarrolló el concepto de impedancia térmica. Esta impedancia se opone a la transferencia de calor a través del paramento cuando la temperatura exterior varía en régimen dinámico. Esta transferencia o flujo de calor provoca una onda térmica en el interior de la vivienda, que está desfasada y amortiguada con respecto a la exterior.

$$i(t) = \text{flujo de calor} = \frac{t_{ext.}}{\bar{Z}}$$

Cuanto mayor es el módulo de  $\bar{Z}$  menor es el pico del flujo de calor y en consecuencia también lo es el pico o amplitud de la onda térmica interior. Las tablas siguientes presentan los resultados que ponen de manifiesto lo antes mencionado.

##### 9.5.4.1. Casos de vivienda pareada

###### 9.5.4.1.1. Sin aislamiento térmico y con muro de cierre del patio

En la tabla siguiente se recogen los valores de la variación de la temperatura de bulbo seco máxima interior, su desfase en horas y en radianes con respecto a la temperatura de bulbo seco máxima exterior en el caso vivienda con paramentos desprovistos de placas aislantes, pareada y con patio dotado de muro de cierre, correspondiente a la vivienda o diseño 1 del apartado 9.5.3.1.

Tabla 91. Efecto de la orientación en casa pareada, sin aislamiento térmico y con patio dotado de muro de cierre

	Orientación de la fachada principal	Temp. máxima exterior (°C)	Temp. máxima interior (°C)	Desfase $\phi$ en horas	Desfase $\phi$ en radianes	Reducción de la amplitud de la onda térmica interior con respecto a la exterior. %
<b>1</b>	E (90°)	34,2	31,61	2	0,5236	7,5730
<b>2</b>	SE (135°)	34,2	31,61	2,5	0,6545	7,5730
<b>3</b>	NO (315°)	34,2	31,64	2,5	0,6545	7,4853
<b>4</b>	N (0°)	34,2	31,68	2	0,5236	7,3684
<b>5</b>	NE (45°)	34,2	31,68	2,5	0,6545	7,3684
<b>6</b>	S (180°)	34,2	31,7	2	0,5236	7,3099
<b>7</b>	O (270°)	34,2	31,7	2,5	0,6545	7,3099
<b>8</b>	SO (225°)	34,2	31,75	2,5	0,6545	7,1637

De la tabla anterior se deduce que con orientación suroeste (SO, 225°) se tiene la mayor temperatura máxima interior, esto es, el porcentaje menor de reducción de la amplitud. Mientras que con la orientación sureste (SE, 135°) se obtiene la menor temperatura máxima interior y el mayor desfase. En consecuencia, queda constatado la influencia de la orientación de la vivienda en el amortiguamiento y desfase.

#### 9.5.4.1.2. Sin aislamiento térmico y sin muro de cierre del patio

En la siguiente tabla puede verse la variación de la temperatura de bulbo seco máxima interior, su desfase en horas y en radianes con respecto a la temperatura de bulbo seco máxima exterior en el caso vivienda con paramentos desprovistos de placas aislantes, pareada y con patio sin de muro de cierre, correspondiente a la vivienda o diseño 2 del apartado 9.5.3.1.

Tabla 92. Efecto de la orientación en casa pareada sin aislamiento térmico y con patio sin muro de cierre.

	<b>Orientación de la fachada principal</b>	<b>Temp. máxima exterior (°C)</b>	<b>Temp. máxima interior (°C)</b>	<b>Desfase <math>\phi</math> en horas</b>	<b>Desfase <math>\phi</math> en radianes</b>	<b>Reducción de la amplitud de la onda térmica interior con respecto a la exterior. %</b>
<b>1</b>	SE(135°)	34,2	31,58	2	0,5236	7,66
<b>2</b>	S(180°)	34,2	31,64	2	0,5236	7,49
<b>3</b>	E(90°)	34,2	31,7	2,5	0,6545	7,31
<b>4</b>	N(0°)	34,2	31,74	2	0,5236	7,19
<b>5</b>	NE(45°)	34,2	31,77	2,5	0,6545	7,11
<b>6</b>	SO(225°)	34,2	31,79	2,5	0,6545	7,05
<b>7</b>	NO(315°)	34,2	31,84	2,5	0,6545	6,90
<b>8</b>	O(270°)	34,2	31,89	2,5	0,6545	6,75

Se puede concluir que en este caso con la orientación oeste (O, 270°) se tiene la mayor temperatura máxima interior, es decir, la reducción mínima de dicha amplitud. Mientras que con la orientación sureste (SE, 135°) se obtiene la menor temperatura máxima interior, es decir, la mayor reducción de dicha amplitud. Sin embargo, para esta orientación el desfase es mínimo.

En este tipo de vivienda se da una cierta incertidumbre ya que los desfases máximos se producen con orientaciones que dan las menores reducciones de la amplitud.

#### 9.5.4.1.3. Con placas aislantes, cámara de aire y sin muro de cierre del patio

Para esta simulación tomamos la configuración más desfavorable explicada en el apartado 9.5.3.1, que se corresponde con orientación noroeste (NO, 225°) y supusimos los casos siguientes:

1. Placas aislantes más cámara de aire tanto en la cara exterior como interior de los paramentos.
2. Placas aislantes más cámara de aire en la cara exterior de los paramentos.
3. Placas aislantes más cámara de aire en la cara interior de los paramentos.
4. Placas aislantes en la cara interior.
5. Placas aislantes en la cara exterior e interior de los paramentos.
6. Paramentos sin placas aislantes.
7. Placas aislantes en la cara exterior.

La tabla siguiente muestra los valores obtenidos.

Tabla 93. Efecto de la colocación de las placas y cámara de aire.

Casos	Temp. máxima exterior (°C)	Temp. máxima interior (°C)	Desfase $\phi$ en horas	Desfase $\phi$ en radianes	Reducción de la amplitud de la onda térmica interior con respecto a la exterior. %
1 Placas en cara interior-exterior + cámara de aire	34,2	31,09	4,5	1,1781	9,09
2 Placas en cara exterior + cámara de aire	34,2	31,18	5,5	1,4399	8,83
3 Placas en cara interior + cámara de aire	34,2	31,19	4,5	1,1781	8,80
4 Placas en cara interior	34,2	31,32	4,5	1,1781	8,42
5 Placas en cara interior-exterior	34,2	31,37	4,5	1,1781	8,27
6 Muros sin placas	34,2	31,38	4,5	1,1781	8,25
7 Placas en cara exterior	34,2	31,44	5,5	1,4399	8,07

De esta simulación se concluye que el mayor porcentaje de reducción y en consecuencia la menor temperatura máxima de bulbo seco interior se consigue con aislamiento térmico más cámara de aire en las caras interior y exterior del muro. En lo que se refiere al desfase máximo (5,5 horas) se produce con las placas aislantes en la cara exterior de los paramentos más cámara de aire y en el caso de exclusivamente aislamiento térmico en la cara exterior. Obsérvese, que sin embargo las temperaturas máximas son muy parecidas, estando comprendidas en el intervalo [31,09 °C-31,44 °C]. Se puede concluir que la mejor solución sería aislamiento exterior más cámara de aire. No obstante, esta opción es económicamente más costosa que la correspondiente a aislamiento térmico exterior sin la cámara de aire, que tiene el mismo desfase y su amplitud es 0,26 °C mayor.

#### 9.5.4.2. Casos de vivienda no pareada

##### 9.5.4.2.1. Sin aislamiento térmico y sin muro de cierre del patio

En la siguiente tabla se recoge, en función de la orientación de la fachada principal, las variaciones de la temperatura de bulbo seco máxima interior, su desfase en horas y radianes con respecto a la temperatura de bulbo seco máxima exterior en el caso vivienda aislada (no pareada) con paramentos desprovistos de placas aislantes y con patio sin muro de cierre, correspondiente a la vivienda o diseño 3 del apartado 9.5.3.1.

Tabla 94. Efectos de la orientación de una vivienda no pareada, sin aislamiento térmico y sin muro de cierre del patio.

	<b>Orientación de la fachada principal</b>	<b>Temp. máxima exterior (°C)</b>	<b>Temp. máxima interior (°C)</b>	<b>Desfase <math>\phi</math> en horas</b>	<b>Desfase <math>\phi</math> en radianes</b>	<b>Reducción de la amplitud de la onda térmica interior con respecto a la exterior. %</b>
<b>1</b>	E (90°)	34,2	31,65	3	0,7854	7,4561
<b>2</b>	SE (135°)	34,2	31,7	2,5	0,6545	7,3099
<b>3</b>	NE (45°)	34,2	31,8	3	0,7854	7,0175
<b>4</b>	N (0°)	34,2	31,86	3,5	0,9163	6,8421
<b>5</b>	S (180°)	34,2	32	2	0,5236	6,4327
<b>6</b>	NO (315°)	34,2	32	3,5	0,9163	6,4327
<b>7</b>	O (270°)	34,2	32,13	3	0,7854	6,0526
<b>8</b>	SO (225°)	34,2	32,17	2,5	0,6545	5,9357

Se puede inferir que con este tipo de casa o vivienda que la orientación suroeste (SO, 225°) se corresponde con la mayor temperatura máxima interior, es decir, con el porcentaje de reducción mínimo. Mientras que con orientación este (E, 90°) se produce la menor temperatura máxima de la citada onda interior.

#### 9.5.4.2.2. Sin aislamiento térmico y con muro de cierre del patio

En la tabla siguiente se observan las variaciones de la temperatura máxima interior en el caso de vivienda no pareada, sin aislamiento térmico y con muro de cierre del patio, correspondiente a la vivienda o diseño 4 del apartado 9.5.3.1.

Tabla 95. Efecto de la orientación en casa no pareada, sin aislamiento térmico y con muro del patio.

	<b>Orientación de la fachada principal</b>	<b>Temp. máxima exterior (°C)</b>	<b>Temp. máxima interior (°C)</b>	<b>Desfase <math>\phi</math> en horas</b>	<b>Desfase <math>\phi</math> en radianes</b>	<b>Reducción de la amplitud de la onda térmica interior con respecto a la exterior. %</b>
<b>1</b>	E (90°)	34,2	31,59	2	0,5236	7,6316
<b>2</b>	NE (45°)	34,2	31,71	2,5	0,6545	7,2807
<b>3</b>	SE (135°)	34,2	31,75	2,5	0,6545	7,1637
<b>4</b>	N (0°)	34,2	31,79	3,5	0,9163	7,0468
<b>5</b>	NO (315°)	34,2	31,8	3,5	0,9163	7,0175
<b>6</b>	O (270°)	34,2	31,93	2,5	0,6545	6,6374
<b>7</b>	S (180°)	34,2	32,05	2	0,5236	6,2866
<b>8</b>	SO (225°)	34,2	32,14	2,5	0,6545	6,0234

Se puede concluir que en esta simulación con la orientación suroeste (SO, 225°) se tiene la mayor temperatura de bulbo seco máxima interior a la que corresponde la reducción mínima. Mientras que con orientación este (E, 90°) se obtiene la menor temperatura máxima interior, que se corresponde la máxima reducción. Los desfases en todos los casos están muy lejos del que corresponde al caso 2 y 7 del apartado 9.5.4.1.3.

9.5.4.3. Caso excepcional en la Rep. Dominicana de vivienda climatizada para mantener su temperatura seca en 26 °C

En el apartado 9.5.3.2 se expuso la siguiente tabla:

Tabla 69. Variación de la temperatura interior y el consumo de energía según la colocación de las placas.

Configuración	Temp. Int. Media sin climatización (°C)	Temp. Int. Media con climatización (°C)	Consumo energía (kWh)	Factor U con película W/(m <sup>2</sup> ·K)	Factor U sin película W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>I. Sin placas</b>	30,35	26,05	69,80	2,21	3,303
<b>II. Placas en el interior</b>	30,32	26,05	69,02	2,068	2,994
<b>III. Placas en el interior más cámara de aire</b>	30,23	26,04	66,36	1,382	1,743
<b>IV. Placas en el interior-exterior</b>	30,38	26,05	69,54	1,942	2,738
<b>V. Placas en el interior-exterior más cámara de aire</b>	30,20	26,05	65,40	1,005	1,183
<b>VI. Placas en el exterior</b>	30,41	26,05	70,40	2,068	2,994
<b>VII. Placas en el exterior más cámara de aire</b>	30,28	26,05	67,87	1,382	1,743

En la tabla siguiente se presentan los resultados del cálculo, como se explicó en el capítulo 6, de la difusividad térmica, efusividad térmica, admitancia térmica y el índice de inercia térmica aplicados a la cara interior de los paramentos de la vivienda. Esta vivienda es la tipo utilizada en los ensayos de campo y en las simulaciones. Los citados cálculos se han realizado para cara interior enlucida y para interior con placas aislantes.

Tabla 96. Parámetros térmicos cara superficial expuesta.

	Material	Difusividad (m <sup>2</sup> /s)	Efusividad (J/[m <sup>2</sup> ·K·s <sup>1/2</sup> ])	Admitancia (W/[m <sup>2</sup> ·K])	Índice de inercia térmica
<b>1</b>	Mortero	0,000 000 56	1341,641	11,377	0,17
<b>2</b>	Placa aislante	0,000 000 27	618,986	5,249	0,16

Estos resultados ayudan a comprender el porqué cuando las placas aislantes más la cámara de aire están colocadas en la cara interior se obtiene mejores resultados térmicos y energéticos como se recoge en la tabla 69, de la cual se observa que el menor consumo de energía para mantener el confort térmico, se da en el caso de aislamiento térmico más cámara de aire tanto en las caras interiores como exteriores de los paramentos, a pesar de que se obtiene mayor desfase de la onda térmica con aislamiento térmico más la cámara de aire en la cara exterior como se vio en el apartado 9.5.4.1.3.

#### 9.5.4.4. Voto medio previsto (VMP)

En la siguiente tabla se recogen los datos de la temperatura operativa y voto medio previsto obtenidos mediante el programa informático *DesignBuilder* (DB). Además, el voto medio previsto también se estimó mediante las tablas del anexo E de la norma UNE-EN ISO 7730:2006 y el voto medio previsto ajustado con el factor de expectativa de Fanger (e) para climas cálidos como se explicó en la sección 5.4.3.1. Para el caso de la R. D. se tomó 0,6 como factor de expectativa. Dicho factor corresponde a regiones con pocos edificios climatizados con periodos cálidos durante todas las estaciones.

Tabla 97. Temperatura operativa y voto medio previsto.

	<b>Casos</b>	<b>Temp. operativa (°C)</b>	<b>VMP Fanger del DB</b>	<b>VMP Fanger calculado</b>	<b>VMPe Ajustado por expectativa (0,6)</b>
<b>1</b>	Placas en cara interior-exterior + cámara de aire	30,21	1,84	1,70	1,02
<b>2</b>	Placas en cara interior + cámara de aire	30,23	1,85	1,71	1,03
<b>3</b>	Placas en cara exterior + cámara de aire	30,29	1,87	1,73	1,04
<b>4</b>	Placas en cara interior	30,33	1,88	1,74	1,04
<b>5</b>	Muros sin placas	30,35	1,89	1,75	1,05
<b>6</b>	Placas en cara interior-exterior	30,38	1,9	1,76	1,05
<b>7</b>	Placas en cara exterior	30,41	1,91	1,76	1,06

Se observa que el VMP que proporciona el DB y el calculado a partir de las tablas de la norma UNE-EN ISO 7730:2006 son similares, esto permite tomar el valor del DB como una aproximación aceptable para evaluar el VMP. El VMP ajustado con el factor de expectativa pone de manifiesto que las personas que viven en climas cálidos tienen una sensación térmica menos severa, en consecuencia, están preparadas para aceptar un ambiente interior más cálido como se explicó en la sección 5.4.3.1.

Nota: El anexo E de la norma UNE-EN ISO 7730:2006 contiene las tablas necesarias para determinar el PMV en función de las siguientes variables:

- Temperatura operativa ( $t_o$ ).
- Producción de energía metabólica (M), en  $W/m^2$ . Para actividades ligeras y en posición de sentado se utiliza tabla E.3-Nivel de actividad: 69,6  $W/m^2$  (1,2 met).
- Aislamiento de la vestimenta (resistencia térmica de la ropa, clo): en verano 0,5.
- Humedad relativa del aire: 50 %.
- Velocidad relativa del aire ( $v_{ra}$ ).  $<0,10$  m/s.
- En la tabla se selecciona el aislamiento de la vestimenta (clo) según la época del año, la  $t_o$ , la  $v_{ra}$ , y finalmente se obtiene el PMV.



## 10. Resumen de conclusiones

En cada capítulo se iban comentando las conclusiones de cada cálculo, ensayo y simulaciones realizadas en esta tesis. Esta tesis se realizó con un contexto social y económico principal, el cual es el contexto de la República Dominicana. Con esta investigación se aporta un conjunto de conocimientos que no están disponibles en el país con lo cual se cubre un vacío técnico y científico en cuanto al tema de la eficiencia energética en la edificación dominicana. De este estudio se obtienen informaciones aplicables a lugares con características parecidas.

En esta tesis se buscó reducir las cargas térmicas en viviendas de construcción mayoritaria dominicanas utilizando materiales que combinan lo sostenible y económico. El país dominicano tiene un clima considerado cálido y húmedo, por lo tanto, las estrategias presentadas aquí se pueden aplicar en países con condiciones climáticas similares. Dichas estrategias pueden ser aplicadas por los diferentes estratos sociales. Pero también se buscó utilizar materiales más amigables con el medio ambiente, prescindiendo de materiales derivados del petróleo.

En vista de que es imprescindible una caracterización climática, pues, para alcanzar los objetivos planteados lo primero que se realizó fue una caracterización climática. Esto es debido a que el territorio dominicano aún no cuenta, para temas de eficiencia energética, con una caracterización climática oficial. De hecho, la ley sobre eficiencia energética aún está en espera de ser aprobada por el Congreso Nacional.

Para realizar la caracterización climática se utilizó la metodología que toma en cuenta el Índice de Severidad Climática (ISC, utilizada también en España). Dicho índice se calcula tanto para invierno como para verano. Pero después de realizar los cálculos se pudo constatar que la República Dominicana no cuenta con invierno propiamente dicho. Debido a esto se hizo una modificación a la metodología, la cual consiste en tomar el invierno como verano y realizar los cálculos como una severidad climática de verano. Esta caracterización supone un aporte para el país dominicano, pero la metodología modificada también se puede utilizar en otros países con características climáticas parecidas.

Aunque se considera un país sin invierno, se observaron periodos mensuales en algunas zonas con variaciones de la temperatura de bulbo seco media que deben tenerse en cuenta, entonces, partiendo de la SCV se establecieron dos tipos de severidades para la República Dominicana:

1. Periodo que va de abril a octubre ambos meses inclusive, meses más "calientes" según el análisis de los datos climatológicos, se le asignó una SCAO (severidad climática abril-octubre).
2. Periodo de noviembre a marzo ambos inclusive, meses menos "calientes" según el análisis de los datos climatológicos, se le asignó una SCLiNM (severidad climática noviembre-marzo).

Las tablas siguientes muestran la asignación realizada para categorizar las nuevas severidades climáticas, con lo que se prescinde de la clasificación europea de severidad climática de invierno y severidad climática de verano.

Severidad climática noviembre-marzo(SCliNM).

V1	V2
$SCT \leq 0,6$	$0,6 < SCT \leq 0,9$

Severidad climática abril-octubre (SCAO).

V3	V4
$0,9 < SCC \leq 1,25$	$SCC > 1,25$

Los resultados obtenidos indican que el 80,00 % del país tienen una severidad climática abril-octubre (SCAO) para todo el año, en muchos casos permanece constante en su grado máximo, V4, y en otros casos de noviembre a marzo baja a V3. El 15,38 % tienen una severidad climática diferenciada: SCliNM de noviembre a marzo y SCAO de abril a octubre. El 4,61 % la tienen SCliNM durante todo el año.

En consecuencia, la mayor parte del territorio dominicano está sometido a una severidad climática abril-octubre (SCAO). Esto obliga a tomar medidas en la edificación que amortigüen en el interior de esta la carga térmica debida a esta severidad y en consecuencia hacerlas más sostenibles.

En el 15,38 % del territorio el periodo de noviembre a marzo es más llevadero ya que su severidad climática es menos caliente y tomando las medidas oportunas con respecto al aislamiento y materiales es plausible que el gasto energético debido a la climatización puede reducirse hasta prácticamente cero. En lo que se refiere al resto del territorio, el 4,61 %, cuya severidad climática a lo largo del año es SCliNM se comprobó que con medidas referentes a la edificación se puede prescindir de sistemas de climatización tomando las medidas adecuadas de aislamiento térmico, orientación de edificios, vegetación, etc.

Este trabajo, valga decir, que es el primero de esta naturaleza en el país, posibilita tener una herramienta para comenzar el desarrollo de las medidas que deben ser estudiadas en los nuevos edificios y en las rehabilitaciones que se vayan haciendo.

Se realizaron ensayos de campo con el material seleccionado aplicado a una vivienda de tipología mayoritaria. Dichos ensayos se modelizaron en *DesignBuilder* y los resultados obtenidos fueron similares a las mediciones reales.

Otro aporte para destacar de esta investigación es la creación de plantillas climáticas para realizar simulaciones en *DesignBuilder*. Ya que para la República Dominicana no se disponía de plantillas con valores y datos propios del territorio dominicano.

Aquí se proponen estrategias para disminuir la demanda y consumo energético con placas aislantes fabricadas con cemento y papel reciclado, aprovechando la ventilación natural cuando las condiciones lo permitan y mitigando las infiltraciones de aire. Estas placas favorecen el reciclaje de materiales y la

utilización de materiales no derivados del petróleo. Estas placas tienen un impacto socioeconómico, ya que se pueden fabricar en el mismo país porque utilizan materiales locales lo que reduce la importación de materiales de fabricación extranjera con sus implicaciones de impuestos y precios. Esto permite, tomando en cuenta los estratos sociales dominicanos, que más personas tengan acceso a estas estrategias de reducción de demanda y consumo de energía.

No existen en la literatura científica estudios que presenten resultados de la aplicación de dichas placas en viviendas. Esta tesis sirve de base para el análisis de dicho material y de esa forma poder compararlos con otros materiales.

Con el modelo se realizaron diferentes simulaciones en el día más cálido para obtener la mejor combinación con los mejores resultados para cada zona climática.

Para la zona con severidad climática SCAO durante todo el año se realizaron diferentes simulaciones:

- Colocando la vivienda en diferentes orientaciones, con y sin muro de cierre en el patio, pareada y no pareada: en consumo de energía, la que registró los resultados más desfavorable fue la casa pareada con muro de cierre en el patio y orientada hacia el noroeste . Los resultados más favorables los tuvo la casa no pareada, con muro de cierre en el patio y orientada hacia el este con un 13,67 % de diferencia entre la más y menos favorables.
- Colocando las placas aislantes en diferentes posiciones (interior, exterior, interior-exterior), combinando las placas aislantes con cámaras de aire, colocando las placas y las cámaras de aire solo en los muros exteriores: los resultados más favorables se registraron con las placas aislantes más cámara de aire colocadas tanto en la cara exterior como interior de los paramentos. Los menos favorables se obtuvieron colocando solo las placas aislantes en la cara exterior con un 7,6 % de diferencia entre el más y menos favorables.
- Controlando la infiltración: la infiltración supone un 47,9 % en el consumo de energía.
- Comparando el comportamiento de las placas y cámaras de aire con otras formas constructivas en la cubierta (gravas y poliestireno, cubierta verde): la vivienda con cubierta verde obtiene los mejores resultados con 46,2 % de reducción en el consumo de energía, seguido de las gravas y poliestireno que registra un 41,99 %, finalmente las placas que registran 40,45 % de reducción en el consumo de energía.
- De todas las simulaciones realizadas para el día más cálido y para la orientación más desfavorable se obtiene que la estrategia que ofrece los mejores resultados (menor consumo de energía) es:
  - En los muros exteriores, placas aislantes más cámara de aire colocadas en el lado exterior, y en el lado interior, colocar las placas aislantes más la cámara de aire, pero para aumentar la eficiencia, colocar en el lado interior una capa extra de papel reciclado de 5 cm.

- En la cubierta, colocar en el lado exterior cámara de aire más las placas aislantes; y por el lado interior colocar cámara de aire más las placas aislantes más una capa extra de papel reciclado 5 cm.
- En las ventanas, doble hoja de vidrio gris de 3 mm con aire de 6 mm y marco de aluminio con rotura de puente térmico.
- Controlando la infiltración al aire y aprovechando la ventilación natural.

En cuanto a la zona con severidad climática diferenciada, se trasladó la misma vivienda simulada en la zona con severidad climática SCAO todo el año, luego de realizar diferentes simulaciones se obtuvo que se puede mantener la vivienda con temperatura interior dentro de la zona confort y sin consumo energético para refrigeración aún en su día más severo, controlando las infiltraciones, aprovechando la ventilación natural y utilizando solamente las placas aislantes más la cámara de aire más la capa extra de papel reciclado en la parte interior tanto de la cubierta como de los muros exteriores.

En cuanto a la zona con severidad climática SCliNM todo el año, se trasladó la misma vivienda simulada en la zona con severidad climática SCAO todo el año, luego de realizar diferentes simulaciones se obtuvo que se puede mantener la vivienda con temperatura interior dentro de la zona de confort y sin consumo energético para climatización solamente aprovechando la ventilación natural.

### 10.1. Futuras líneas de investigación.

Como futuras líneas de investigación proponemos analizar y evaluar el efecto del *free-cooling* con equipos mecánicos como ventiladores que introduzcan el aire exterior hacia el interior de la vivienda. Ya que en esta tesis solo se utilizó la ventilación natural con las ventanas abiertas.

También proponemos investigar la combinación de estrategias con el uso del efecto chimenea, pozo canadiense y otras estrategias pasivas.

Debido a que para esta tesis solo se colocaron las placas y realizaron mediciones en uno de los muros exteriores, se debe investigar el comportamiento sobre una vivienda entera. Además, evaluar el desempeño de la vivienda con ocupantes y diferentes renovaciones del aire por hora. Pero también desarrollar estudios de campo para determinar cuál es el rango de temperatura de confort para el país, aplicando tanto el método Fanger como uno adaptativo.

Disponer de la medida de flujo de calor en la superficie interior de muros exteriores para corroborar el tema de la validación de un modelo del componente modelado.

## 11. Referencias

1. **de Coninck, H., A. Revi, M. Babiker, P. Bertoldi, M. Buckeridge, A. Cartwright, W. Dong, J. Ford, S. Fuss, J.-C. Hourcade, D. Ley.** Strengthening and Implementing the Global Response. [aut. libro] V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.) Masson-Delmotte. *SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 °C*. Geneva : IPCC, 2018, 4, pág. 331.
2. **Agencia Internacional de la Energía.** IEA. [En línea] 2019. [Citado el: 21 de 06 de 2019.] <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings/>.
3. **Ugarte, Jimena.** *GUIA BIOCLIMATICA CONSTRUIR CON EL CLIMA*. s.l. : INSTITUTO DE ARQUITECTURA TROPICAL. pág. 5.
4. **Fondo Monetario Internacional.** FMI. [En línea] 04 de 2019. [Citado el: 24 de 06 de 19.] <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2019/01/weodata/index.aspx>.
5. **Fondo Monetario Internacional (FMI).** [En línea] 04 de 2019. [Citado el: 25 de 06 de 19.] <https://www.imf.org/external/datamapper/datasets/WEO/1>.
6. **Banco Central de la República Dominicana.** [En línea] 1991-2018. [Citado el: 24 de 06 de 2019.] <https://www.bancentral.gov.do/a/d/2533-sector-real>.
7. **Sistema de Información Energética Nacional (SIEN).** *Balances Nacionales Energéticos (BNEN) 1998-2018 – Actualizado 13 Mayo 2019 (kTep)*. Santo Domingo : Comisión Nacional de Energía de la República Dominicana, 2019.
8. **Oficina Nacional de Estadística (ONE) de la República Dominicana.** *IX Censo nacional de población y vivienda 2010 informe general volumen I*. Santo Domingo : s.n., 2012. págs. 166, 183, 201, 300.
9. **Vicens, Guillermo De Ignacio; Castro, Silvia Soutullo; López-Zaldívar, Óscar; Lozano-Díez, Rafael Vicente; Vázquez, Amparo Verdú.** *Sobre inercia térmica y aislamiento de viviendas en clima cálido-húmedo*. s.l. : Anales de Edificación, 2018. págs. 14-26. Vol. 4. ISSN: 2444-1309.
10. **Comisión Nacional de Energía (CNE) de la República Dominicana.** *PROSPECTIVA DE LA DEMANDA DE ENERGÍA DE REPÚBLICA DOMINICANA 2010-2030*. 2014. págs. 14-18.
11. **Sistema de Información Energética Nacional (SIEN).** *Potencia instalada y generación por fuentes\_Anexo 1 Balances Nacionales Energéticos (BNEN) 2018 - Actualizado al 13 de mayo 2019*. Santo Domingo : Comisión Nacional de Energía (CNE) de la República Dominicana, 2019.
12. **Joseph C. Lama, C.L. Tsang, L. Yang, Danny H.W. Li.** *Weather data analysis and design implications for different climatic zones in China*. s.l. : Building and Environment, 2005. págs. 277–296. Vol. 40. ISSN: 0360-1323.

13. **F. Asdrubali, M. Bonaut, M. Battisti, M. Venegas.** *Comparative study of energy regulations for buildings in Italy and Spain.* s.l. : Energy and Buildings, 2008. págs. 1805-1815. Vol. 40. ISSN: 0378-7788.
14. **Khedari, J., Sangprajak, A. y Hirunlabh, J.** *Thailand climatic zones.* s.l. : Renewable Energy, 2002. págs. 267-280. Vol. 25. ISSN: 0960-1481.
15. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).** *Standard 169-2013, Climatic Data for Building Design Standards.* 2013.
16. **Chartered Institution of Buildings Services Engineers (CIBSE).** *Degree-days: theory and application TM41:2006.* London : s.n., 2006. ISBN-10: 1-903287-76-6.
17. **Hernández, Aramís Fonte y Jaspe, Zoltan Rivero.** Método de los GradosDía. Determinación de la temperatura base para la provincia de Camagüey. *Cuba Solar.* [En línea] [Citado el: 10 de 11 de 2016.] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar09/HTML/articulo04.htm>.
18. **González, Guillermo Saura y Rodríguez, Ricardo Osés.** Estudio de los Días-Grado con fines térmicos en Santa Clara. *Cuba Solar.* [En línea] [Citado el: 10 de 11 de 2016.] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar02/HTML/Articulo05.htm>.
19. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).** *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.* 2017. págs. 7, 10. ISSN 1041-2336.
20. **Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) de España.** 2009.
21. **Abel Tablada, Ana M. De la Peña and Frank De Troyer.** *Thermal Comfort of Naturally Ventilated Buildings in Warm-Humid Climates: field survey.* s.l. : In: Proceedings of the 22nd conference on passive low energy architecture. Beirut, Lebanon: PLEA; 2005., 2005.
22. **Tablada A, de Troyer F, Blocken B, Carmeliet J, Verschure H.** *On natural ventilation and thermal comfort in compact urban environments - the Old Havana case.* s.l. : Building and Environment, 2009. págs. 1943-1958. Vol. 44. ISSN: 0360-1323.
23. **N. Yamtraipat, J. Khedari, J. Hirunlabh.** *Thermal comfort standards for air conditioned buildings in hot and humid Thailand considering additional factors of acclimatization and education level.* s.l. : Solar Energy, 2005. págs. 504-517. Vol. 78.
24. **Al-Tamimi, Nedhal Ahmed M. y Fadzil, Sharifah Fairuz Syed.** *Thermal Performance Analysis for Ventilated and Unventilated Glazed Rooms in Malaysia (Comparing Simulated and Field Data).* s.l. : Indoor and Built Environment, 2011. págs. 534-542. Vol. 20.
25. **Henry Feriadi, Nyuk Hien Wong.** *Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia.* s.l. : Energy and Buildings, 2004. págs. 614-626. Vol. 36. ISSN: 0378-7788.

26. **Karyono, Tri Harso.** *Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta-Indonesia.* s.l. : Building and Environment, 2000. págs. 77-90. Vol. 35. ISSN: 0360-1323.
27. **Asit Kumar Mishra, Maddali Ramgopal.** *Field studies on human thermal comfort - An overview.* s.l. : Building and Environment, 2013. págs. 94-106. Vol. 64. ISSN: 0360-1323.
28. **Moreno, Ana Cecília Rodrigues, Morais, Ingrid Stephanie de y Souza, Roberta Vieira Gonçalves de.** *Thermal Performance of Social Housing- A Study Based on Brazilian Regulations.* s.l. : Energy Procedia, 2017. págs. 111-120. Vol. 111. ISSN: 1876-6102.
29. **Jamaludin, Nazhatulzalkis; Mohammed, Nurul Izma; Khamidi, Mohd Faris; Wahab, Suriani Ngah Abdul.** *Thermal Comfort of Residential Building in Malaysia at Different Micro-climates.* s.l. : Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2015. págs. 613-623. Vol. 170. ISSN: 1877-0428.
30. **Gutiérrez, Teresa, Romero, Ramona y Sotelo, Cristina.** *Thermal Energy Impact of Bioclimatic Techniques Applied to Low-income Housing in a Hot Dry Climate.* s.l. : Energy Procedia, 2014. págs. 1743-1752. Vol. 57. ISSN: 1876-6102.
31. **Borge-Diez, David; Colmenar-Santos, Antonio; Pérez-Molina, Clara; Castro-Gil, Manuel.** *Passive climatization using a cool roof and natural ventilation for internally displaced persons in hot climates: Case study for Haiti.* s.l. : Building and Environment, 2013. págs. 116-126. Vol. 59. ISSN: 0360-1323.
32. **Ran, Jiandong y Tang, Mingfang.** *Passive cooling of the green roofs combined with night-time ventilation and walls insulation in hot and humid regions.* s.l. : Sustainable Cities and Society, 2018. págs. 466-475. Vol. 38. ISSN: 2210-6707.
33. —. *Effect of Green Roofs Combined with Ventilation on Indoor Cooling and Energy Consumption.* s.l. : Energy Procedia, 2017. págs. 260-266. Vol. 141. ISSN: 2661876-6102.
34. **Jiang, Lin y Tang, Mingfang.** *Thermal analysis of extensive green roofs combined with night ventilation for space cooling.* s.l. : Energy and Buildings, 2017. págs. 238-249. Vol. 156. ISSN: 0378-7788.
35. **Pellegrino, Margot, Simonetti, Marco y Chiesa, Giacomo.** *Reducing thermal discomfort and energy consumption of Indian residential buildings: Model validation by in-field measurements and simulation of low-cost interventions.* s.l. : Energy and Buildings, 2016. págs. 145-158. Vol. 113. ISSN: 0378-7788.
36. **Portal Oficial del Estado Dominicano.** Geografía y Clima Dominicanos. [En línea] [Citado el: 13 de 08 de 2019.] <http://dominicana.gob.do/index.php/pais/2014-12-16-20-31-30>.
37. **Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo (MEPyD) de la República Dominicana.** *Evolución de la población de la República Dominicana por estratos de ingreso en 2000-2015 según definición del BM/PNUD.* Santo Domingo : s.n., 2015. págs. 6-8.

38. **Ferreira, Francisco H. G.; Messina, Julian; Rigolini, Jamele; López-Calva, Luis-Felipe; Lugo, Maria Ana; Vakis, y Renos.** *Panorámica General: La movilidad económica y el crecimiento de la clase media en América Latina.* Washington, DC : Banco Mundial. Licencia: Creative Commons de Reconocimiento CC BY 3.0, 2013.
39. **Frómeta, Yokasta I. García.** *OPTIMIZACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES RESIDENCIALES: UNA APLICACIÓN AL CASO DE LA REPÚBLICA DOMINICANA.* s.l. : Tesis doctoral por la Universidad del País Vasco UPV/EHU, 2018.
40. **Lora, Kelvin Rafael Méndez.** *PANELES ESTRUCTURALES DE POLIESTIRENO EXPANDIDO: ANÁLISIS ENERGÉTICO EN EL CLIMA TROPICAL- HÚMEDO DE SANTO DOMINGO Y APLICADO A LA VIVIENDA SOCIAL (CASO SISTEMA EMMEDUE).* s.l. : Trabajo de fin de máster (TFM) - Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
41. **Comisión Nacional de Energía (CNE) de la República Dominicana.** *Boletín trimestral de estadísticas Energéticas octubre-diciembre 2018.* Santo Domingo : s.n., 2018.
42. **Walsh, Angélica, Cóstola, Daniel y Labaki, Lucila Chebel.** *Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs.* s.l. : Building and Environment, 2017. págs. 337-350. Vol. 112. ISSN: 0360-1323.
43. **Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).** *Acondicionamiento térmico de edificios, clasificación bioambiental de la República Argentina norma IRAM 11603:1996.* 2011.
44. **Yilmaz, Z.** *Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate.* s.l. : Energy and Buildings, 2007. págs. 306-316. Vol. 39. ISSN: 0378-7788.
45. **Código Técnico de la Edificación (CTE) de España.** Documento Básico Ahorro de Energía (DB-HE) - documento descriptivo climas de referencia. [En línea] 2017. [Citado el: 05 de 07 de 2019.] <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/20170202-DOC-DB-HE-0-Climas%20de%20referencia.pdf>.
46. **Verichev, Konstantin y Carpio, Manuel.** *Climatic zoning for building construction in a temperate climate of Chile.* s.l. : Sustainable Cities and Society, 2018. págs. 352-364. Vol. 40. ISSN: 2210-6707.
47. **Código Técnico de la Edificación (CTE) de España.** *Documento básico HE Ahorro de energía - HE 1 Limitación de demanda energética: Ápendice D zonas climáticas.* 2009. págs. 31-33.
48. **Borah, Pallavi, Singh, Manoj Kumar y Mahapatra, Sadhan.** *Estimation of degree-days for different climatic zones of North-East India.* s.l. : Sustainable Cities and Society, 2015. págs. 70-81. Vol. 14. ISSN: 2210-6707.
49. **Rosa, Mattia De, y otros.** *Historical trends and current state of heating and cooling degree days in Italy.* s.l. : Energy Conversion and Management, 2015. págs. 323-335. Vol. 90. ISSN: 0196-8904.



50. **Badescu, Viorel y Zamfir, Elena.** *Degree-days, degree-hours and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures (Romania).* s.l. : Energy Conversion & Management, 1999. págs. 885-900. Vol. 40. ISSN: 0196-8904.
51. **Martinaitis, V., Bieksa, D. y Miseviciute, V.** *Degree-days for the exergy analysis of buildings.* s.l. : Energy and Buildings, 2010. págs. 1063-1069. Vol. 42. ISSN: 0378-7788.
52. **Sen, Zekai y Kadioglu, Mikdat.** *Heating degree-days for arid regions.* s.l. : Energy, 1998. págs. 1089-1094. Vol. 23. ISSN: 0360-5442.
53. **K. Papakostas, N. Kyriakis.** *Heating and cooling degree-hours for Athens and Thessaloniki, Greece.* s.l. : Renewable Energy, 2005. págs. 1873-1880. Vol. 30. ISSN: 0960-1481.
54. **Satman, A. y Yalcinkaya, N.** *Heating and cooling degree-hours for Turkey.* s.l. : Energy, 1999. págs. 833-840. Vol. 24. ISSN: 0360-5442.
55. **Mourshed, Monjur.** *Relationship between annual mean temperature and degree-days.* s.l. : Energy and Buildings, 2012. págs. 418-425. Vol. 54. ISSN: 0378-7788.
56. **Guttman, Nathaniel B. y Lehman, Richard L.** *Estimation of Daily Degree-hours.* s.l. : Journal of Applied Meteorology, 1992. págs. 797-810.
57. **Aktacir, Mehmet Azmi; Büyükalaca, Orhan; Bulut, Hüsamettin; Yilmaz, Tuncay.** *Influence of different outdoor design conditions on design cooling load and design capacities of air conditioning equipments.* s.l. : Energy Conversion and Management, 2008. págs. 1766-1773. Vol. 49. ISSN: 0196-8904.
58. **Cox, Rimante A.; Drews, Martin; Rode, Carsten; Nielsen, Susanne Balslev.** *Simple future weather files for estimating heating and cooling demand.* s.l. : Building and Environment, 2015. págs. 104-114. Vol. 83. ISSN: 0360-1323.
59. **Christenson, M., Manz, H. y Gyalistras, D.** *Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland.* s.l. : Energy Conversion and Management, 2006. págs. 671-686. Vol. 47. ISSN: 0196-8904.
60. **Mourshed, Monjur.** *The impact of the projected changes in temperature on heating and cooling requirements in buildings in Dhaka, Bangladesh.* s.l. : Applied Energy, 2011. págs. 3737-3746. Vol. 88. ISSN: 0306-2619.
61. **Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE).** *Climate change and the indoor environment: Impacts and adaptation TM36.* 2005.
62. **Durmayaz, Ahmet, Kadioglu, Mikdat y Sen, Zekai.** *An application of the degree-hours method to estimate the residential heating energy requirement and fuel consumption in Istanbul.* s.l. : Energy, 2000. págs. 1245-1256. Vol. 25. ISSN: 0360-5442.
63. **Quayle, Robert G. y Díaz, Henry F.** *Heating Degree Day Data Applied to Residential Heating Energy Consumption.* s.l. : Journal of applied meteorology, 1980. págs. 241-246. Vol. 19.

64. **United States Energy Information Administration (EIA)**. Degree-Days - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy. [En línea] [Citado el: 07 de 08 de 2019.] [https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=about\\_degree\\_days](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=about_degree_days).
65. **Bailes, Allison**. The Fundamentals of Heating and Cooling Degree Days, Part 2. *Energy Vanguard*. [En línea] [Citado el: 07 de 08 de 2019.] [http://www.energyvanguard.com/bl\(YJ\)/77163/The-Fundamentals-of-Heating-and-Cooling-Degree-Days-Part-2](http://www.energyvanguard.com/bl(YJ)/77163/The-Fundamentals-of-Heating-and-Cooling-Degree-Days-Part-2).
66. **Jinghua Yu, Changzhi Yang, Liwei Tian, Dan Liao**. *A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China*. s.l. : Applied Energy, 2009. págs. 2520–2529. Vol. 86. ISSN: 0306-2619.
67. **Tsikaloudaki, Katerina y Bikas., Kostas Laskos and Dimitrios**. *On the Establishment of Climatic Zones in Europe with Regard to the Energy Performance of Buildings*. s.l. : Energies, 2012. págs. 32-34. Vol. 5. ISSN 1996-1073.
68. **Lee, Kyoungmi, Baek, Hee-Jeong y Cho, ChunHo**. *The Estimation of Base Temperature for Heating and Cooling Degree-Days for South Korea*. s.l. : Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014. págs. 300-309. Vol. 53.
69. **Sailor, David J. y Muñoz, J. Ricardo**. *Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the U.S.A.—Methodology and results for eight states*. s.l. : Energy, 1997. págs. 987-998. Vol. 22. ISSN: 0360-5442.
70. **Lindelöf, David**. *Bayesian estimation of a building's base temperature for the calculation of heating degree-days*. s.l. : Energy and Buildings, 2017. págs. 154-161. Vol. 134. ISSN: 0378-7788.
71. **Energy Lens**. *Degree days - Handle with care!* [En línea] [Citado el: 07 de 08 de 2019.] <https://www.energylens.com/articles/degree-days>.
72. **Shi, Ying; Zhang, Dong-Feng; Xu, Ying; Zhou, Bo-Tao**. *Changes of heating and cooling degree days over China in response to global warming of 1.5 °C, 2 °C, 3 °C and 4 °C*. s.l. : Advances in Climate Change Research, 2018. págs. 192-200. Vol. 9. ISSN: 1674-9278.
73. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)**. *Handbook: Fundamentals*. 2009.
74. **Fantini, L. y Schenone, C**. *Degree-days, population distribution and heating energy consumption: The Italian case*. s.l. : International Journal of Ambient Energy, 2001. págs. 199-210. Vol. 22. ISSN: 0143-0750.
75. **Matzarakis, Andreas y Balafoutis, Christos**. *Heating degree-days over Greece as an index of energy*. s.l. : International Journal of Climatology, 2004. págs. 1817-1828. Vol. 24.
76. **Büyükalaca, Orhan, Bulut, Hüsamettin y Yılmaz, Tuncay**. *Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey*. s.l. : Applied Energy, 2001. págs. 269-283. Vol. 69. ISSN: 0306-2619.
77. **Dombaycı, Ö. Altan**. *Degree-days maps of Turkey for various base temperatures*. s.l. : Energy, 2009. págs. 1807-1812. Vol. 34. ISSN: 0360-5442.

78. **Idchabani, Rachida, Garoum, Mohamed y Khaldoun, Asmae.** *Analysis and mapping of the heating and cooling degree-days for Morocco at variable base temperatures.* s.l. : International Journal of Ambient Energy, 2015. págs. 190-198. Vol. 36. ISSN: 0143-0750.
79. **Al-Hadhrami, L. M.** *Comprehensive review of cooling and heating degree days characteristics over Kingdom of Saudi Arabia.* s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. págs. 305-314. Vol. 27. ISSN: 1364-0321.
80. **El-Shaarawi, M. A. I. y Al-Masri, N.** *Weather data and heating-degree days for Saudi Arabia.* s.l. : Energy, 1996. págs. 39-44. Vol. 21. ISSN: 0360-5442.
81. **Ortiz Beviá, M. J.; Sánchez-López, G.; Alvarez-García, F. J.; Ruiz de Elvira, A.** *Evolution of heating and cooling degree-days in Spain: Trends and interannual variability.* s.l. : Global and Planetary Change, 2012. págs. 236-247. Vol. 92. ISSN: 0921-8181.
82. **Jiang, Fengqing; Li, Xuemei; Wei, Binggan; Hu, Ruji; Li, Zhen.** *Observed trends of heating and cooling degree-days in Xinjiang Province, China.* s.l. : Theor Appl Climatol, 2009. págs. 349-360. Vol. 97.
83. **Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL).** NSRDB data viewer. *Departamento de Energía de los Estados Unidos de América, Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable.* [En línea] [Citado el: 09 de 08 de 2019.] <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/?aL=UdPEX9%25Bv%25D%3Dt&bL=groad&cE=0&IR=0&mC=31.653381399664%2C-3.1640625&zL=2>.
84. **Krese, Gorazd, Prek, Matjaž y Butala, Vincenc.** *Analysis of building electric energy consumption data using an improved cooling degree day method.* s.l. : Journal of Mechanical Engineering, 2012. págs. 107-114. Vol. 58.
85. **Markus, Thomas A.** *Development of a cold climate severity index.* s.l. : Energy and Buildings, 1982. págs. 277-283. Vol. 4.
86. **Flor, Francisco José Sánchez de la, Lissén, José M. Salmerón y Domínguez, Servando Álvarez.** *A new methodology towards determining building performance under modified outdoor conditions.* s.l. : Building and Environment, 2006. págs. 1231-1238. Vol. 41. ISSN: 0360-1323.
87. **Salmerón, J. M.; Álvarez, S.; Molina, J. L.; Ruiz, A.; Sánchez, F. J.** *Tightening the energy consumptions of buildings depending on their typology and on Climate Severity Indexes.* s.l. : Energy and Buildings, 2013. págs. 372-377. Vol. 58. ISSN: 0378-7788.
88. **Carpio, Manuel; Jódar, Joaquín; Rodríguez, Miguel L.; Zamorano, Montserrat.** *A proposed method based on approximation and interpolation for determining climatic zones and its effect on energy demand and CO2 emissions from buildings.* s.l. : Energy and Buildings, 2015. págs. 253-264. Vol. 87. ISSN: 0378-7788.
89. **Flor, Francisco José Sánchez de la; Domínguez, Servando Álvarez; Félix, José Luis Molina; Falcón, Rocío González.** *Climatic zoning and its application to Spanish building energy performance regulations.* s.l. : Energy and Buildings, 2008. págs. 1984-1990. Vol. 40. ISSN: 0378-7788.

90. **Rubel, Franz y Kottek, Markus.** *Comments on: "The thermal zones of the Earth" by Wladimir Köppen (1884).* 2011. págs. 361-365. Vol. 20. ISSN: 0941-2948.
91. **Universidad de Alcalá de Henares.** Prácticas de climatología. *Adscripción de tipos climáticos según clasificación de Köppen a estaciones meteorológicas del mundo.* [En línea] [Citado el: 04 de 07 de 2019.] [http://www.geogra.uah.es/docs\\_pdf\\_geoplanveg/Curso\\_2011-2012/cuadernillo\\_practicas\\_grado\\_ciencias\\_ambientales\\_2012.pdf](http://www.geogra.uah.es/docs_pdf_geoplanveg/Curso_2011-2012/cuadernillo_practicas_grado_ciencias_ambientales_2012.pdf).
92. **Meteo Navarra.** Clasificación climática de Köppen. [En línea] [Citado el: 04 de 07 de 2019.] <http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>.
93. **TuTiempo.net.** *Clasificación climática mundial según Köppen.* [En línea] [Citado el: 12 de 08 de 2019.] <https://www.tutiempo.net/meteorologia/clasificacion-climatica-mundial.html>.
94. **National Renewable Energy Laboratory (NREL).** NREL Transforming ENERGY. [En línea] [Citado el: 13 de 08 de 2019.] <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary.html>.
95. **Ugarte, Jimena.** *Guía de arquitectura bioclimática - Construir en países cálidos.* s.l. : Instituto de Arquitectura Tropical, 2011. pág. 3.
96. **Oficina Internacional del Trabajo (OIT).** *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo.* Tercera. 1998. págs. 42.2-42.3. Vol. II. ISBN: 84-8417-047-0.
97. **Gisolfi, C. V.; Wenger, C. B.** *Temperature regulation during exercise: old concepts, new ideas.* s.l. : Exercise Sport Sci Rev, 1984. págs. 339-372. Vol. 12. ISSN: 0091-6331.
98. **Román, Consolación Ana Acha.** *Tesis Doctoral: Estudio experimental de las condiciones de confort relacionadas con parámetros higrotérmicos y calidad de aire.* s.l. : Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 2005.
99. **Mondelo, Pedro R. y al., Enrique Gregori Torada et.** *Ergonomía 2. Confort y estrés térmico.* s.l. : Universidad Politecnica de Cataluña (UPC), 1995.
100. **Çengel, Yunus A. y Boles, Michael A.** *Termodinámica octava edición.* s.l. : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES. ISBN: 978-607-15-0743-3.
101. **UNE-EN ISO 7726:2002.** *Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas.*
102. **Guillén, María Belén Lara.** *Evaluación del bienestar térmico a través de la temperatura operativa.* s.l. : Servicio de Higiene Industrial y Salud Laboral de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).
103. **(OMS), Organización Mundial de la Salud.** *Problemas de salud con el trabajo en condiciones de sobrecargas térmicas (serie de informes técnicos número 412).* 1969.
104. **ISO 7243:1989.** *Ambientes calurosos. Estimación del estrés térmicos del hombre en el trabajo basados en el índice WBGT (temperatura de globo y bulbo húmedo).*

105. **ISO 7933:1989.** *Ambientes térmicos calurosos. Determinación analítica e interpretación del estrés térmico, basado en el cálculo de la tasa de sudoración requerida.*
106. **UNE-EN ISO 7730:2006.** *Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005).*
107. **NTP 779.** *Bienestar térmico: criterios de diseño para ambientes térmicos confortables.* s.l. : Instituto Nacional de Seguridad e Salud en el Trabajo de España (INSST), 2007.
108. **Markov, Detelin.** *Practical evaluation of the thermal comfort.* s.l. : Technical University of Sofía Bulgaria, 2002.
109. **Real Decreto 1027/2007, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)(BOE 29/08/2007).**
110. **Fanger, P. Ole y Toftum, Jorn.** *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates.* s.l. : Energy and Buildings, 2002. págs. 533-536. Vol. 34. ISSN: 0378-7788.
111. **Fanger, P. O.** *Thermal comfort.* s.l. : Danish Technical Press, 1970.
112. **CEN ISO 7730.** *Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.* s.l. : International Organization for Standardization, 1994.
113. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE).** *ASHRAE 55-1992R Thermal environmental conditions for human occupancy.*
114. **Dear, R. de y Brager, G. S.** *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.* s.l. : ASHRAE Transactions 104 (1a), 1998. págs. 145-167.
115. **Brager, G. S. y Dear, R. de.** *Thermal adaptation in the built environment: a literature review.* s.l. : Energy and Buildings, 1998. págs. 83-96. Vol. 27.
116. **Nicol, J. F. y Kessler, M. R. B.** *Perception of comfort in relation to weather and adaptive opportunities.* s.l. : ASHRAE Transactions 104 (1a), 1998. págs. 1005-1017.
117. **Dear, R. de.** *A global database of thermal comfort field experiments.* s.l. : ASHRAE Transactions 104 (1b), 1998. págs. 1141-1152.
118. **Busch, J. F.** *A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand.* s.l. : Energy and Buildings, 1992. págs. 235-249. Vol. 18.
119. **Dear, R. de y Auliciems, A.** *Validation of the predicted mean vote model of thermal comfort in six Australian field studies.* s.l. : ASHRAE Transactions 91 (2), 1985. págs. 452-468.

120. Baker, N. y Standeven, M. *in: Proceedings from CIBSE National Conference on A behavioural approach to thermal comfort assessment in naturally ventilated buildings*. 1995. págs. 76-84.
121. Dear, R. de, Leow, K. G. y Foo, S. C. *Thermal comfort in the humid tropics: field experiments in air-conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore*. s.l. : International Journal of Biometeorology, 1991. págs. 259-265. Vol. 34.
122. Fountain, M. E. y Huizenga, C. *A thermal sensation prediction tool for use by the profession*. s.l. : ASHRAE Transactions 103 (2), 1997. págs. 130-136.
123. Dear, R. de, Ring, J. W. y Fanger, P. O. *Thermal sensations resulting from sudden ambient temperature changes*. s.l. : Indoor Air 3, 1993. págs. 181-192.
124. Turégano, J. A., Hernández, M. A. y García, F. *La inercia térmica de los edificios y su incidencia en las condiciones de confort como refuerzo de los aportes solares de carácter pasivo*. s.l. : ConArquitectura: Arquitectura con arcilla cocida, 2003. págs. 65-80. ISSN: 1578-0201.
125. Arancibia, Pablo Mosquera. *Tesis doctoral: Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida*. s.l. : Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 2013.
126. Goulart, Solange V. G. *Thermal Inertia and Natural Ventilation – Optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil*. s.l. : Open University, 2004.
127. Centro de Terminología TERMCAT. *Diccionario de Física*.
128. Ministerio de la Residencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática de España. *Anexo 1 de BOE-A-1979-24866 Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios*. 1979.
129. González, Francisco Javier Neila y Frutos, César Bedoya. *El comportamiento térmico y la inercia térmica de las fábricas con bloques Termoarcilla*. s.l. : NA: nueva arquitectura con arcilla cocida, 1997. págs. 63-76. ISSN: 1135-3384.
130. Çengel, Yunus A. y Ghajar, Afshin J. *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones cuarta edición*. s.l. : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, 2011. ISBN: 978-607-15-0540-8.
131. UNE-EN ISO 7345:1996. *Aislamiento térmico. Magnitudes físicas y definiciones*.
132. ACTIMAT. *Adimendum. Materialak. Boletín externo*. 2009.
133. Yannas, S.; E. Maldonado. *Handbook on Passive Cooling - Comfort Climate & Building Design*. s.l. : London and Porto, European Commission PASCOOL Project, Joule II - Programme, 1995.

134. Liman, K.; F. Allard. *Ventilation - Thermal mass subtask - Final report*. s.l. : La Rochele, France, University of La Rochelle, 1995.
135. Barea, R. *Conductividad térmica en materiales cerámicos bifásicos*. s.l. : Universidad Autónoma de Madrid (UAM), 2004.
136. Barbeta Solá, G. *Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenida hacia el siglo XXI*. s.l. : Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), 2002.
137. Villar, M. V. *Thermo-hydro-mechanical characterisation of a bentonite from Cabo de Gata*. s.l. : Publicaciones técnicas Enresa, 2002. pág. 258.
138. Domínguez, Manuel, García, Carmen y Arias, José María. *Factores importantes en el comportamiento térmico de cerramientos. Ventajas de la incorporación de los materiales de cambio de fase*. s.l. : Instituto del frío. CSIC, 2009.
139. Domínguez, Manuel y García, David. *La impedancia térmica de los cerramientos. Nuevo concepto que puede facilitar de forma considerable el ahorro energético*. s.l. : NA: nueva arquitectura con arcilla cocida, 1999. ISSN: 1135-3384.
140. Domínguez, Manuel y Santamaría, S. *Importancia de la inercia térmica de los cerramientos*. s.l. : ConArquitectura, 2001. ISSN: 1578-0201.
141. Domínguez, M., y otros. *Importancia de la capacidad térmica en la resistencia al paso del calor en los cerramientos*. s.l. : ConArquitectura, 2003. ISSN: 1578-0201.
142. Escalona, Vanessa. *Incidencia de la inercia térmica en edificios de uso intermitente*. s.l. : ETS de Ingeniería Industrial de Barcelona, 2007.
143. Bahadori, M. N.; Haghghat, F. *Weekly storage of coolness in heavy brick and adobe walls*. s.l. : Energy and Buildings, 1985. págs. 259-270.
144. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). *Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios*. s.l. : Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2008.
145. Yáñez, G. *Energía solar, edificación y clima*. s.l. : MOPU, 1982.
146. Pérez, Jesús B., y otros. *Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico*. s.l. : Información Tecnológica, 2011. ISSN: 0718-0764.
147. Borbón, Ana C. y Pérez, Rafael E. Cabanillas y Jesús B. *Modelación y simulación de la transferencia de calor en muros de bloque de concreto hueco*. s.l. : Información Tecnológica, 2010. págs. 27-38. Vol. 21. ISSN: 0718-0764.

148. Anderson, B. R. *On the calculation of the U-value of walls containing slotted bricks or blocks*. s.l. : Building and Environment, 1981. págs. 41-50. Vol. 16.
149. Abdou, Ossama A. y B., Kris S. Murali. *The effect of air cells and mortar joints on the thermal resistance of concrete masonry walls*. s.l. : Energy and Buildings, 1994. págs. 111-119. Vol. 21. ISSN: 0378-7788.
150. Vasile, C., Lorente, S. y Perrin, B. *Study of convective phenomena inside cavities coupled with heat and mass transfers through porous media—application to vertical hollow bricks—a first approach*. s.l. : Energy and Buildings, 1998. págs. 229-235. Vol. 28. ISSN: 0378-7788.
151. Al-Hazmy, Majed M. *Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks*. s.l. : Energy and Buildings, 2006. págs. 515-521. Vol. 38. ISSN: 0378-7788.
152. Borbón, Ana C., Cabanillas, Rafael E. y Pérez, Jesús B. *Determinación experimental y contraste numérico de la resistencia térmica de un muro de bloques de concreto hueco*. s.l. : Información Tecnológica, 2010. págs. 163-176. Vol. 21. ISSN: 0718-0764.
153. Homan, J. P. *Transferencia de calor. Octava edición (primera en español)*. s.l. : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 1998. ISBN: 84-481-2040-X.
154. Ibarra, María del Carmen. *La ecuación del calor de Fourier: resolución mediante métodos de análisis en variable real y en variable compleja*. s.l. : Universidad Tecnológica Nacional.
155. ElSherbiny, S. M., Raithby, G. D. y Hollands, K. G. T. *Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers*. s.l. : Journal of Heat Transfer, 1982. págs. 96-102. Vol. 104. ISSN: 1528-8943.
156. Holman, J. P. *Transferencia de calor. Décima edición*. s.l. : McGRAW HILL BOOK COMPANY, 1999. ISBN: 0-07-0229618-9.
157. Frómeta, Yokasta García, Valero, Letzai Ruiz y Rojo, Jesús Cuadrado. *Indoor temperature and relative humidity assessment of three construction systems for Dominican social housing in different micro-climates: A modelling study*. s.l. : Indoor and Built Environment, 2018. págs. 693-710. Vol. 28.
158. García, Yokasta; Cuadrado, Jesús; Blanco, Jesús M.; Roji, Eduardo. *Optimizing the indoor thermal behaviour of housing units in hot humid climates: Analysis and modelling of sustainable constructive alternatives*. s.l. : Indoor and Built Environment, 2018. págs. 772-789. Vol. 28.
159. Félix-Benitez, Joan M.; Peña-Suárez, J. Nicolás; Portillo-Valdés, Luis A. Del; Campo-Díaz, Victor J. Del. *REDUCCIÓN DE LA FACTURA ELÉCTRICA DEL SECTOR COMERCIAL EN LA REPÚBLICA DOMINICANA MEDIANTE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN SOLAR*. s.l. : 13º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2017.



160. DesignBuilder Ltd. *Manual de ayuda DesignBuilder en español*. 2014.
161. DesingBuilder. DesignBuilder Software. [En línea] [Citado el: 21 de 08 de 2019.] <https://designbuilder.co.uk/helpv4.7/#cshid=63>.
162. Wilcox, S. y Marion, W. *Users Manual for TMY3 Data Sets*. s.l. : National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2008.
163. Ebrahimpour, Abdulsalam y Maerefat, Mehdi. *A method for generation of typical meteorological year*. s.l. : Energy Conversion and Management, 2010. págs. 410-417. Vol. 51. ISSN: 0196-8904.
164. Cebecauer, T. y Suri, M. *Typical Meteorological Year data: SolarGIS approach*. s.l. : Energy Procedia, 2015. págs. 1958-1969. Vol. 69. ISSN: 1876-6102.
165. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. s.l. : Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2012. ISBN: 978-84-96680-60-9.
166. Moody, Seth S. y Sailor, David J. *Development and application of a building energy performance metric for green roof systems*. s.l. : Energy and Buildings, 2013. págs. 262-269. Vol. 60. ISSN: 0378-7788.
167. Shafique, Muhammad, Kim, Reeho y Rafiq, Muhammad. *Green roof benefits, opportunities and challenges – A review*. s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. págs. 757-773. Vol. 90. ISSN: 1364-0321.
168. González, Aitor Erkoreka. *Modeling and testing of green roof using the PASLINK methodology*. s.l. : Tesis doctoral por la Universidad del País Vasco UPV/EHU, 2012.
169. Hashemi, Sajedeh Sadat Ghazizadeh, Mahmud, Hilmi Bin y Ashraf, Muhammad Aqeel. *Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review*. s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. págs. 669-679. Vol. 52. ISSN: 1364-0321.
170. Nyuk Hien Wonga, Yu Chen, Chui Leng Ong, Angelia Sia. *Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment*. s.l. : Building and Environment, 2003. págs. 261 – 270. Vol. 38. ISSN: 0360-1323.
171. Onmura, S., Matsumoto, M. y Hokoi, S. *Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens*. s.l. : Energy and Buildings, 2001. págs. 653 - 666. Vol. 33. ISSN: 0378-7788.
172. L.Getter, Kristin, y otros. *Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate*. s.l. : Energy and Buildings, 2011. págs. 3548-3557. Vol. 43. ISSN: 0378-7788.

**173. Sailor, D.J. *A green roof model for building energy simulation programs*. s.l. : Energy and Buildings, 2008. págs. 1466–1478. Vol. 40. ISSN: 0378-7788.**

**174. Niachou, A., y otros. *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*. s.l. : Energy and Building, 2001. ISSN: 0378-7788.**

**175. Sánchez, María. *The Cambium Design - La inercia térmica en las casas de madera \_ Parte 1*. [En línea] [Citado el: 16 de 08 de 2019.] <https://www.thecambiumdesign.com/the-cambium-design-blog/construccion/la-inercia-termica-en-las-casas-de-madera-parte-1/>.**

**176. Passive-On project. *The Passivehaus standard in european warm climates: a review of comfortable low energy homes*. 2007.**

**177. Felix, Joan, Portillo, Luis Del y Izquierdo, Raykenler. *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS DE LA REPÚBLICA DOMINICANA*. s.l. : Proceedings of the 1st Iberic Conference on Theoretical and Experimental Mechanics and Materials / 11th National Congress on Experimental Mechanics, 2018.**

**178. Sánchez, María. *The Cambium Design - La inercia térmica en las casas de madera \_ Parte 2*. [En línea] [Citado el: 16 de 08 de 2019.] <https://www.thecambiumdesign.com/the-cambium-design-blog/construccion/inercia-termica-casas-de-madera-parte-2/>.**