

# Simulación dinámica y aplicación de la Termoeconomía en un edificio del sector terciario

---

Máster en Ingeniería Industrial

Curso 2015/2016

**Jon Fernández Luzuriaga**

[jfernandez164@ikasle.ehu.es](mailto:jfernandez164@ikasle.ehu.es)

Director: José María Sala Lizarraga

[josemariapedro.sala@ehu.eus](mailto:josemariapedro.sala@ehu.eus)

Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao

Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

# Contenido

Resumen.....	6
1. Introducción.....	7
2. Objetivos.....	8
3. Fundamentos teóricos .....	9
3.1. La exergía .....	9
3.1.1. Estado de referencia .....	11
3.1.2. Exergía del calor .....	13
3.1.3. Exergía de la materia.....	15
3.2. Métodos de análisis exergético .....	16
3.2.1. Método simplificado .....	16
3.2.2. Método detallado.....	16
3.2.3. Evaluación cuasi-estacionaria .....	17
3.3. Análisis termoeconómico.....	17
3.3.1. Métodos termoeconómicos.....	18
3.3.2. Teoría del Coste Exergético.....	19
4. Beneficios del proyecto. Importancia del análisis exergético.....	24
5. Estado del arte.....	26
5.1. Consideración del sector de la edificación en global .....	26
5.2. Análisis de instalaciones de edificios .....	27
5.3. Trabajos referidos a la envolvente de edificios .....	27
6. Edificios de bajo consumo exergético: edificios LowEx .....	29
7. Análisis de alternativas .....	33
8. Análisis de riesgos.....	34
9. Metodología .....	36
9.1. Programa de simulación .....	36
9.2. Descripción del edificio .....	37
9.2.1. Zonas térmicas .....	38
9.2.2. Envolvente.....	38
9.2.3. Escenarios.....	51
9.2.4. Otras consideraciones de la simulación dinámica.....	55
9.2.5. Agua Caliente Sanitaria .....	56
9.3. Instalación.....	58
9.3.1. Control de la instalación.....	59
9.3.2. Nivel de agregación .....	60
9.3.3. Proposiciones de la Termoeconomía .....	61
9.3.4. Costes .....	62
10. Aspectos económicos.....	64

11.	Resultados .....	66
11.1.	Simulación dinámica .....	66
11.1.1.	Influencia de los puentes térmicos .....	70
11.1.2.	Influencia del sombreado .....	71
11.1.3.	Influencia conjunta de sombreado y puentes térmicos .....	71
11.1.4.	Demanda de exergía .....	72
11.2.	Análisis Termoeconómico.....	73
11.2.1.	Horas de funcionamiento.....	73
11.2.2.	Consumo .....	74
11.2.3.	Rendimientos .....	74
11.2.4.	Costes unitarios.....	75
11.2.5.	El coste de la energía.....	77
12.	Conclusiones.....	80
13.	Referencias.....	82
	Anexo I: planos acotados.....	84
	Anexo II: composición de cerramientos .....	88
	Anexo III: ventanas del edificio.....	90
	Anexo IV: puentes térmicos .....	91

#### **Lista de tablas**

Tabla 1: definiciones de exergía <sup>[4]</sup> .....	9
Tabla 2: transmitancia térmica de los cerramientos definidos en TRNSYS. ....	38
Tabla 3: absortividad solar de la superficie exterior de cada cerramiento definido. ....	39
Tabla 4: cerramientos definidos para el sótano no calefactado. ....	41
Tabla 5: cerramientos definidos para el sótano calefactado. ....	41
Tabla 6: cerramientos definidos para la planta baja. ....	43
Tabla 7: cerramientos definidos en la primera planta. ....	45
Tabla 8: cerramientos definidos en la segunda planta.....	46
Tabla 9: características térmicas de la ventana tipo definida en TRNSYS. ....	47
Tabla 10: área y orientación de las ventanas del edificio.....	47
Tabla 11: ángulos de altura angular de los obstáculos en cada sombreado definido en TRNSYS.....	49
Tabla 12: transmitancia térmica lineal de cada puente térmico del edificio analizado. ....	50
Tabla 13: perfil de ocupación y ganancias debidas a equipos considerando el DB Ahorro de Energía del CTE. ....	51
Tabla 14: perfil de ocupación resultante de considerar el DB Seguridad en caso de incendio del CTE. ....	52
Tabla 15: perfil de ocupación y ganancias por equipos introducidas en TRNSYS.....	52
Tabla 16: distribución de la plantilla del edificio. ....	57
Tabla 17: componentes agrupados en cada uno de los equipos a considerar en el análisis.....	61
Tabla 18: definición de los fueles y productos considerados en cada equipo. ....	61
Tabla 19: ecuaciones obtenidas de la aplicación de las proposiciones de la Termoeconomía. ....	61
Tabla 20: costes exergéticos y económicos considerados de los componentes de la instalación. ....	62
Tabla 21: costes exergéticos y económicos totales de los equipos considerados en el análisis. ....	63
Tabla 22: comparativa del precio del kWh de gas natural por comercializadora. ....	63
Tabla 23: distribución del coste de los recursos humanos por tareas realizadas.....	64
Tabla 24: distribución de los costes de herramientas y material. ....	65
Tabla 25: desglose de los costes de servicios.....	65
Tabla 26: resumen de costes del proyecto. ....	65
Tabla 27: demanda de calefacción por mes.....	69

Tabla 28: demanda de calefacción por mes modelizando el edificio sin puentes térmicos.....	70
Tabla 29: demanda de calefacción por mes modelizando el edificio sin sombreamientos. ....	71
Tabla 30: demanda de calefacción por mes sin modelizar puentes térmicos ni sombreamientos. ....	71
Tabla 31: demanda de exergía calculada con el método simplificado y con el método detallado. ....	72
Tabla 32: horas de funcionamiento y amortización exergética de cada equipo. ....	73
Tabla 33: horas de funcionamiento y amortización económica de cada equipo. ....	73
Tabla 34: distribución del consumo y coste de gas natural y electricidad de la instalación.....	74
Tabla 35: rendimiento energético máximo, mínimo y medio obtenido en cada equipo. ....	74
Tabla 36: rendimiento exergético máximo, mínimo y medio obtenido en cada equipo. ....	75
Tabla 37: costes exergéticos unitarios medios de los flujos analizados. ....	76
Tabla 38: costes exergéticos unitarios medios de los productos de los equipos considerados. ....	76
Tabla 39: costes económicos unitarios medios de los flujos analizados. ....	76
Tabla 40: costes económicos unitarios medios de los productos de los equipos considerados. ....	77
Tabla 41: evolución del coste exergético de la energía.....	78
Tabla 42: evolución del coste económico de la energía.....	79

### Lista de ilustraciones

Ilustración 1: esquema de un ciclo térmico de potencia reversible <sup>[6]</sup> .....	13
Ilustración 2: relación entre un ciclo térmico de potencia reversible y la exergía de calor <sup>[6]</sup> .....	14
Ilustración 3: dirección de la transferencia de exergía en relación a la transferencia de calor y las temperaturas T y T <sub>0</sub> <sup>[6]</sup> .....	15
Ilustración 4: comparativa de la calidad energética demandada por cada uso <sup>[6]</sup> .....	24
Ilustración 5: esquema óptimo de abastecimiento energético en función del uso. ....	25
Ilustración 6: fachada del Hotel de Croy <sup>[2]</sup> .....	30
Ilustración 7: esquema de la instalación de Lienaertstraat Geleen <sup>[2]</sup> .....	31
Ilustración 8: viviendas adosadas ecológicas “Amboise” <sup>[2]</sup> .....	31
Ilustración 9: vista de las fachadas acristaladas y las lamas metálicas del edificio. ....	37
Ilustración 10: vista desde la Avenida Campazar de los accesos del edificio. ....	37
Ilustración 11: desniveles en los lados longitudinal (izq) y transversal (dcha) de la parcela.....	37
Ilustración 12: vista en planta de las dos zonas térmicas definidas para el sótano. ....	38
Ilustración 13: localización de cada cerramiento del sótano no calefactado en plano acotado. ....	41
Ilustración 14: localización de cada cerramiento del sótano calefactado en plano acotado. ....	42
Ilustración 15: vestíbulo central de la planta baja. ....	42
Ilustración 16: proyección frontal de la fachada principal del edificio.....	43
Ilustración 17: localización de cada cerramiento de la planta baja en plano acotado. ....	44
Ilustración 18: plano alzado de la fachada noreste semienterrada. ....	44
Ilustración 19: localización de cada cerramiento de la primera planta en plano acotado. ....	45
Ilustración 20: cristaleras de la segunda planta. ....	46
Ilustración 21: localización de cada cerramiento de la segunda planta en plano acotado. ....	47
Ilustración 22: factor de sombra provocado por las lamas metálicas en una consulta.....	48
Ilustración 23: sombreamiento debido al retranqueo de la planta baja respecto a la primera planta.....	49
Ilustración 24: termografía de un edificio que muestra diferentes puentes térmicos.....	50
Ilustración 25: evolución de las temperaturas de cada zona térmica en caso de no definir ninguna refrigeración. ...	53
Ilustración 26: evolución de la demanda de calefacción en el caso de no definir ninguna refrigeración. ....	54
Ilustración 27: esquema definido en TRNSYS para la simulación de la recuperación de calor del sistema de ventilación.....	55
Ilustración 28: evolución de la temperatura ambiental considerada en la simulación. ....	55
Ilustración 29: evolución de la temperatura del terreno considerada en la simulación. ....	56
Ilustración 30: esquema de la instalación introducida en TRNSYS.....	59
Ilustración 31: nivel de agregación de la instalación considerado en el análisis exergético. ....	60

### Lista de gráficos

Gráfico 1: evolución del factor de calidad de un calor en función de su temperatura <sup>[6]</sup> .....	14
Gráfico 2: consumo energético residencial en el mundo <sup>[4]</sup> .....	24
Gráfico 3: perfil de consumo considerado de ACS, durante tres días consecutivos.....	58
Gráfico 4: comparativa del precio de 2015 del kWh de electricidad por comercializadora.....	63

Gráfico 5: calendario de duración de las tareas realizadas. ....	64
Gráfico 6: evolución de la demanda de calefacción del edificio. ....	66
Gráfico 7: influencia de la infiltración (línea roja) y ventilación (azul) en la demanda de calefacción. ....	66
Gráfico 8: evolución de la temperaturas interiores por zona térmica. ....	67
Gráfico 9: evolución de las temperaturas interiores de las zonas térmicas del sótano y planta baja. ....	68
Gráfico 10: evolución de la temperatura interior de la segunda planta. ....	68
Gráfico 11: evolución de la demanda de calefacción por zona térmica. ....	69
Gráfico 12: demanda de calefacción por mes. ....	69
Gráfico 13: evolución de la demanda de exergía para calefacción del edificio. ....	72
Gráfico 14: desglose de la exergía destruida total por equipos. ....	75
Gráfico 15: evolución del coste exergético unitario del producto de la caldera 1. ....	77
Gráfico 16: evolución del coste exergético de la energía para calefacción. ....	78
Gráfico 17: evolución del coste exergético de la energía para producción de ACS. ....	78
Gráfico 18: evolución del coste económico de la energía calefacción. ....	79
Gráfico 19: evolución del coste económico de la energía para producción de ACS. ....	79

## Resumen

Todo proceso real en un sistema energético es irreversible y destruye una cantidad de exergía, consumiendo un recurso natural y creando un coste. El análisis exergético proporciona una base objetiva para la localización de las ineficiencias y asignación de costes económicos a los productos. La mayor parte de la energía requerida en el sector de la edificación es utilizada para mantener la temperatura de la zona térmica alrededor de los 20°C. Los niveles de temperatura necesarios para calefacción de espacios son bajos y la calidad de la energía demandada es pequeña. En el presente trabajo se estudia el comportamiento energético de un edificio del sector terciario respecto a la calefacción. Se realiza una simulación dinámica de la demanda de calefacción del edificio. Se analiza el funcionamiento de su instalación a lo largo de un año. La aplicación de la Termoeconomía permite el cálculo de la evolución del coste de la energía a lo largo de los procesos termodinámicos de la instalación, localizando aquellos más irreversibles y su influencia en el coste.

**Palabras clave:** edificación, energía, irreversibilidad, exergía, coste económico, Termoeconomía, calefacción.

## Laburpena

Sistema energetiko batean, edozein prozesu erreal itzulezina da eta exergia kantitate bat suntsitzen du, errekurtso natural bat kontsumituz eta kostu bat sortuz. Analisi exergetikoak oinarri objektibo bat eskaintzen du inefizientziak aurkitu eta produktuei kostu ekonomiko bat esleitzeko. Eraikuntzan, energiaren zatirik handirik gune termikoaren temperatura 20°C-tan mantentzeko erabiltzen da. Berokuntzak eskatzen duen temperatura maila eta energiaren kalitatea txikiak dira. Lan honetan hirugarren sektoreko eraikin baten berokuntzarekiko portaera aztertzen da. Eraikinaren berokuntza eskakizunen simulazio dinamiko bat burutzen da. Bere instalakuntzaren urte beteko funtzionamendua aztertzen da. Termoekonomiaren aplikazioak energia kostuaren eboluzioaren kalkulua baimentzen du, prozesu termodinamikoak pairatzen duen heinean, itzulezinagoak diren horiek identifikatu eta kostuan duten eragina ezagutzeko.

**Hitz gakoak:** eraikuntza, energia, itzulezintasuna, exergia, kostu ekonomikoa, Termoeconomia, berokuntza.

## Abstract

Any real process in an energy system is irreversible and destroys a certain quantity of exergy, consuming natural resources and producing a cost. The exergetic analysis provides an objective base for spotting inefficiencies and assigning monetary costs to the products. The greatest part of the required energy in the building sector is used for maintaining the temperature of the thermal zone around 20°C. The temperature levels for heating are low and the quality of the demanded energy is poor. In the present work, the energetic behaviour of a building from the tertiary sector is studied, by performing a dynamic simulation of the heating demand of the building together with the analysis of the installation's functioning across a year. Application of Thermoeconomics drives the calculation of the evolution of the energy costs through all the Thermodynamic processes of the installation, detecting the most irreversible and their influence in the total cost.

**Key words:** building, energy, irreversibility, exergy, monetary cost, Thermoeconomics, heating.

## 1. Introducción

La sociedad actual, su nivel de vida y bienestar están íntimamente ligados al consumo de gran cantidad de recursos materiales y energía. Una parte importante de estos recursos es consumida en el sector terciario, tanto residencial como servicios, que junto con el sector transporte, forman los denominados “sectores difusos”. En ellos las medidas a llevar a cabo para limitar el consumo de energía resultan más complejas de implementar que en el caso de la industria.

La Construcción Sostenible deberá entenderse como la construcción tradicional, pero con una responsabilidad considerable con el medio ambiente. Ello implica un análisis de las diferentes alternativas en el proceso de construcción, buscando aquella que favorezca la minimización del agotamiento de los recursos, que prevenga la degradación ambiental y proporcione un ambiente saludable, tanto en el interior de los edificios como en su entorno.

En Europa, los edificios son responsables del 40% del consumo de energía final y del 50% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, en tanto que en España, el sector terciario (residencial y servicios) tiene un peso en el consumo del 28% (un 18% las viviendas y un 10% los servicios). Además, recordemos que a nivel global, el sector de la edificación es responsable de un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero, un tercio del consumo energético y un tercio de la generación de residuos y del consumo de recursos.

Centrándonos en la energía, la reducción de su consumo en los edificios es un elemento clave en ese objetivo hacia la mejora de la eficiencia energética y, en última instancia, hacia la sostenibilidad. Para ello, el camino a seguir consistirá en ir introduciendo nuevas formas de aprovechamiento energético, maximizando la utilización de las fuentes de energía renovable y fomentando la utilización extensiva de las TIC para la monitorización y control de todas las funciones y sistemas.

En estos años pasados los esfuerzos para maximizar la eficiencia energética en los edificios se han centrado en, por una parte, mejorar los elementos de la envolvente (fachadas, ventanas, cubiertas) y, por otra, en las instalaciones (calefacción, ventilación, refrigeración e iluminación). No obstante, esta visión ha alcanzado sus límites, ya que el comportamiento de cada elemento depende en gran medida del sistema del que forma parte, de forma que por ejemplo, una bomba de calor depende no sólo del equipo como tal, sino también del sistema de calefacción y refrigeración en su conjunto.

En la última década, se han aprobado en la UE diversas Directivas que imponen requisitos de eficiencia energética para la nueva construcción y las intervenciones en rehabilitación. La visión europea para la recuperación del crecimiento económico del sector de la construcción, en el actual contexto de crisis económica y social, tiene como línea de acción principal las actuaciones dirigidas a aflorar el potencial de los edificios de bajo consumo de energía, invirtiendo principalmente en la renovación y mantenimiento de edificios existentes, además de en las nuevas edificaciones.

## 2. Objetivos

El objetivo central del presente trabajo es la aplicación de la Termoeconomía a la instalación de calefacción y Agua Caliente Sanitaria (ACS en lo que sigue) de un edificio del sector terciario, de manera que pueda finalmente calcularse la evolución del coste de los productos de dicha instalación. Esos productos serán la energía de calefacción y el ACS. Debe subrayarse que no se ha considerado el análisis de ningún sistema de refrigeración.

Para ello, previamente es necesario obtener la demanda de calefacción que le corresponde al edificio. A partir de esa demanda, y considerando un consumo de ACS, es posible analizar el funcionamiento de la instalación mencionada a lo largo de un año. De esta manera puede evaluarse dicho funcionamiento y localizar los equipos responsables de un mayor incremento del coste de los productos.

Por lo tanto, en el presente trabajo se realiza un análisis energético y exergético global del edificio, en el que pueden enumerarse los siguientes objetivos.

- Modelización del edificio mediante un software de simulación transitoria para el cálculo de su demanda de calefacción. Análisis de la influencia de diversos factores en ella.
- Cálculo de la demanda de exergía de calefacción del edificio, a partir de la obtención de la demanda de calefacción y mediante la aplicación de ambos métodos de análisis exergético, el simplificado y el detallado.
- Definición de la instalación de calefacción y ACS del edificio. Implementación del control en el software y simulación del funcionamiento de la misma a lo largo de un año.
- Aplicación de la Termoeconomía a los resultados obtenidos de la última simulación. Análisis del funcionamiento de cada equipo, localización de los puntos de mayor destrucción de exergía y cálculo de la evolución del coste exergético y económico de la energía a medida que sufre procesos termodinámicos.

En definitiva, se realiza un análisis integral del funcionamiento del edificio como sistema de energía, siempre considerando únicamente la calefacción y el Agua Caliente Sanitaria. Se tratará de poner de manifiesto el valor añadido que supone la utilización del método exergético en la evaluación de sistemas y sus componentes.

Previamente a la realización del análisis, se realiza una aproximación al análisis exergético, con el objetivo de contextualizar y definir el marco de sus aplicaciones. De esta manera, se presentan un resumen de los fundamentos teóricos sobre los que se sostiene, los beneficios que conlleva y un estudio del estado del arte.



### 3. Fundamentos teóricos

#### 3.1. La exergía

Parece contradictorio afirmar que todo fenómeno natural macroscópico que tiene lugar conlleva una conservación de la energía total y, simultáneamente decir, refiriéndose a un proceso cualquiera, que en dicho proceso la energía “se consume” <sup>[1]</sup>. Es obvio que hacer uso de la palabra “energía” no es estrictamente correcto en la segunda afirmación.

Sin embargo, en términos de exergía sí que es posible hablar de la exergía consumida en un proceso. Dicho proceso se denomina proceso de “exergía-entropía”, porque el incremento de la segunda es proporcional al consumo de la primera. En resumen, cualquier sistema realiza los cuatro pasos enumerados a continuación <sup>[2]</sup>:

1. Alimentación de exergía
2. Consumo de exergía
3. Generación de entropía
4. Disposición de la entropía

Y todo ello mientras la energía total del sistema se conserva. Se trata, por lo tanto, de un concepto que va más allá del de “energía” y la primera ley de la termodinámica, estando relacionado como se ve con la entropía y, por tanto, la segunda ley de la termodinámica.

La exergía puede definirse como el máximo trabajo que puede obtenerse de una cantidad de energía. Se trata por tanto del potencial de una cantidad energética para producir una salida útil, antes de que esa energía se disperse en un ambiente.

En efecto, la exergía cuantifica el potencial de la energía y materia de dispersarse en el ambiente, mientras que la entropía cuantifica ese estado de dispersión <sup>[2]</sup>. Es decir, la exergía cuantifica no sólo la energía disponible en un sistema, sino también su calidad disponible respecto a un estado o ambiente de referencia <sup>[3]</sup>.

La fracción de la energía que ya ha sido dispersada y que no puede producir trabajo, cuantificada mediante la entropía, se denomina anergía. Se concluye por tanto que la exergía consumida en un proceso es equivalente a la anergía generada, siendo ambas igual a la entropía generada multiplicada por la temperatura del estado de referencia.

La siguiente tabla muestra otras definiciones de la exergía que pueden encontrarse en la bibliografía <sup>[4]</sup>.

Tabla 1: definiciones de exergía <sup>[4]</sup>.

Rant	Exergy is defined as that part of energy that can be fully converted into any other kind of energy
Rickert	Exergy is the shaft work or electrical energy to produce a material in its specified state from materials common in the environment in a reversible way, heat being exchanged only with the environment at temperature T0
Szargut et al.	Exergy is a measure of a quality of various kinds of energy and is defined as the amount of work obtainable when some matter is brought to a state of thermodynamic equilibrium with the common components of the natural surroundings by means of reversible processes, involving interaction only with the abovementioned components of nature
Kotas	The work equivalent of a given form of energy is a measure of its exergy, which is defined as the maximum work, which can be obtained from a given form of energy using the environmental parameters as the reference state
Shukuya	Exergy is defined as a measure of dispersion potential of energy and matter, while entropy is defined as a measure that indicates the dispersion of energy and matter
Bejan	Exergy is the minimum theoretical useful work required to form a quantity of matter from substance

	present in the environment and to bring the matter to a specified state. Exergy is a measure of the departure of the state of the system from that of the environment, and is therefore an attribute of the system and environment together
Moran and Shapiro	Exergy is the maximum theoretical work that can be extracted from a combined system consisting of the system under study and the environment as the system passes from a given state to equilibrium with the environment - that is, passes to the dead state at which the combined system possesses energy, but no exergy
Connelly and Koshland	The property exergy defines the maximum amount of work that may theoretically be performed by bringing a resource into equilibrium with its surroundings through a reversible process
Honerkamp	The maximum fraction of an energy form, which (in a reversible process) can be transformed into work is called exergy. The remaining part is called energy, and this corresponds to the waste heat
Ala-Juusela	Exergy is the concept, which quantifies the potential of energy and matter to disperse in the course of their diffusion into their environment, to articulate what is consumed within a system
Tsatsaronis	Exergy of a thermodynamic system is the maximum theoretical useful work (shaft work or electrical work) obtainable as the system is brought into complete thermodynamic equilibrium with the thermodynamic environment while the system interacts with this environment only
Gunnawiek and Rosen	Exergy can be viewed as a measure of the departure of a substance from equilibrium with a specified reference environment, which is often modelled as the actual environment. The exergy of an emission to the environment, therefore, is a measure of the potential of the emission to change or impact the environment. The greater the exergy of an emission, the greater is its departure from equilibrium with the environment, and the greater may be its potential to change or impact the environment
Cengel and Boles	The exergy of a person in daily life can be viewed as the best job that person can do under the most favourable conditions. The exergy of a person at a given time and place can be viewed as the maximum amount of work he or she can do at that time and place
Wordiq	Exergy is the maximum amount of work that can be extracted from a physical system by exchanging matter and energy with large reservoirs in a reference state.
Wikipedia	In thermodynamics, the exergy of a system is the maximum useful work possible during a process that brings the system into equilibrium with a heat reservoir
Wiktionary	In thermodynamics, exergy is a measure of the actual potential of a system to do work, while in systems energetics, entropy-free energy
Geoseries	Exergy expresses the quality of an energy source and quantifies the useful work that may be done by a certain quantity of energy
Clickstormgroup	In thermodynamics, the exergy of a system is the maximum work possible during a process that brings the system into equilibrium with a heat reservoir

De las definiciones presentadas puede concluirse que la electricidad es el 100% exergía: toda su energía es convertible a trabajo. Con el calor, sin embargo, esto no ocurre, por lo que en un punto posterior se presenta el modo de calcular la exergía contenida en él en función de su temperatura. El estado de una cantidad de energía será, por tanto, el que defina qué fracción de esa energía es exergía.

Por otro lado, se habrá observado que en varias ocasiones se ha hecho referencia al “ambiente” o “estado de referencia”. Este estado teórico se define como el estado con el que al llegar al equilibrio un sistema habrá consumido toda su exergía y por tanto se trata de un estado en el que la exergía es cero: no existe la posibilidad de generar trabajo. En un apartado posterior se ahondará en este estado de referencia teórico.

Por lo tanto, todos los sistemas que se encuentren en un estado de falta de equilibrio respecto al estado de referencia poseen exergía. En ausencia de electricidad, magnetismo, tensión superficial y reacción nuclear, la exergía total de un sistema consiste en los siguientes tipos de exergía:

$$B = B^{ph} + B^{kn} + B^{pt} + B^{ch} \quad (1)$$

- Exergía física o termomecánica. Se divide en energía térmica, debida a la diferencia de temperatura, y en exergía mecánica, debida a la diferencia de presión. A su vez, la exergía térmica se divide en exergía de calor y exergía de frío.
- Exergía cinética, debido a una velocidad del sistema respecto al estado de referencia.
- Exergía potencial, debido a una diferente elevación respecto al estado de referencia.

- Exergía química, debido a la diferente composición química del sistema y el estado de referencia.

Nótese que la exergía se ha indicado con la letra B. En lo que sigue se continuará con esta nomenclatura.

Para el análisis de sistemas que pueden encontrarse en la edificación, principalmente sistemas de calefacción y refrigeración, es la exergía física la verdaderamente importante. En el caso concreto de combustibles, como puede el gas natural en calderas, es la exergía química la que debe considerarse. Serán, por tanto, estos tipos de exergía los únicamente considerados en el presente trabajo.

### 3.1.1. Estado de referencia

Se ha definido la exergía como el máximo trabajo extraíble de un sistema en relación con un estado de referencia cuyo potencial de trabajo es nulo. Por lo tanto, es indispensable definir con rigor dicho estado de referencia, puesto que toda exergía se calculará respecto a este estado, será relativa a él.

Pueden encontrarse diferentes opciones a la hora de escoger dicho estado o ambiente de referencia. Sin embargo, debe subrayarse que dicho estado de referencia, a diferencia del caso de las tablas termodinámicas, no puede elegirse de manera arbitraria. La razón es que si bien un análisis energético se basa en la diferencia entre dos estados, y por lo tanto la referencia considerada se nivela, en un análisis exergético esto no ocurre y los valores considerados como referencia influyen de manera importante los resultados obtenidos.

Por lo tanto, el sistema de referencia que se adopte debe cumplir los tres requisitos fundamentales siguientes:

- Ser ilimitado, tanto actuando como sumidero como haciéndolo como fuente. Debe absorber toda la entropía generada en los procesos de energía considerados (Baher, 2005) y actuar como fuente de calor y materia a intercambiar con el sistema analizado (Dincer, Rosen, 2007).
- No sufrir variaciones debido a su interacción con los procesos a analizar. Sus propiedades intensivas no deben cambiar (Baher, 2005).
- Estar siempre disponible.

En lo que sigue se presentan unas breves consideraciones sobre posibles estados de referencia propuestos:

- El Universo como estado de referencia

La temperatura del Universo es muy baja, de alrededor de 3 K, lo que permite una transferencia de energía en forma de radiación desde la Tierra. De esta manera, desde una perspectiva de la conservación de la energía, la Tierra sería un sistema abierto que recibiría un flujo de energía desde el Sol, energía mareomotriz de cuerpos celestes y energía geotérmica de procesos nucleares en la corteza terrestre, radiando o reflejando finalmente toda esa energía de vuelta al Universo.

La mayor parte de esa energía se emite como calor de baja temperatura, lo que permite desechar entropía y considerar, por lo tanto, el Universo como el sumidero final de los

procesos energéticos que tienen lugar en un sistema. Además, este sumidero sería infinito y no sufriría ninguna variación en sus propiedades intensivas.

Sin embargo, considerando el universo como estado de referencia, se está considerando una exergía mayor que la que en realidad está disponible para ser usada, ya que en realidad no es posible llevar un sistema como un edificio a un equilibrio con el Universo.

- El aire interior del edificio como estado de referencia

A pesar de que ha sido propuesto como posible estado de referencia, lo cierto es que el aire interior no ni es un sumidero infinito, ni tampoco está en equilibrio termodinámico, ya que su temperatura varía debido a los procesos de energía que tienen lugar en el edificio.

Considerando esta referencia, la demanda de exergía del edificio resultaría nula.

- El terreno como estado de referencia

Puede observarse como un sumidero infinito, y sus propiedades permanecen inalteradas como resultado de las interacciones con el edificio analizado. Sin embargo, la objeción más importante a la hora de considerar este estado es la misma que la mencionada en el caso del Universo: no está siempre directamente disponible y listo para ser usado. Los valores de exergía que se obtendrían no serían totalmente aprovechables.

- El aire ambiente circundante como estado de referencia

Este aire puede considerarse como el sumidero último de los procesos que tienen lugar en el edificio. Además, su volumen es suficientemente importante como para considerar que la interacción con el edificio no provocará cambios en su temperatura, presión o composición química. Por último, la interacción con el edificio es directa, lo que significa que la exergía calculada con esta referencia estaría siempre disponible y lista para ser usada.

Se recomienda, por tanto, considerar el aire exterior circundante como estado de referencia, ya que es el único sistema que cumple, como se ha visto, los tres requisitos fundamentales presentados anteriormente.

Sin embargo, es cierto que en realidad este ambiente natural no está en equilibrio, así como que sus propiedades intensivas varían tanto espacial como temporalmente. Por ello, existen modelos para el ambiente de referencia que tratan de lograr un compromiso entre los requerimientos teóricos y el comportamiento real de este ambiente. La temperatura, la presión y la concentración de las diferentes especies químicas en el aire se consideran uniformes.

En el estudio desarrollado en el presente trabajo se ha seguido este criterio, considerando las condiciones climáticas proporcionadas por *Meteonorm* para Bilbao como las condiciones del estado de referencia utilizado.

Cuando un sistema está en equilibrio con el ambiente, el estado del sistema se denomina “estado muerto”, debido a que su exergía es cero. En ese estado, se satisfacen las condiciones de equilibrio mecánico, térmico y químico entre el sistema y el ambiente. Además, el sistema no tiene movimiento o elevación respecto al ambiente <sup>[5]</sup>. En estas condiciones, no existe

posibilidad de variación espontánea en el sistema y en el ambiente, ni tampoco posibilidad de interacción entre ambos.

Puede identificarse, sin embargo, otro tipo de equilibrio entre el sistema y el ambiente. Se trata de una forma restringida, en la que únicamente se satisfacen las condiciones de equilibrio térmico y mecánico. Ese estado se denomina “estado muerto restringido”, y es válido cuando se analiza un sistema con velocidad y elevación nulas respecto al ambiente y en el que no existe posibilidad de flujo másico entre ambos (límite sellado, impermeable) <sup>[5]</sup>.

### 3.1.2. Exergía del calor

El cálculo de la exergía de calor se basa en un ciclo térmico de potencia reversible: el ciclo de Carnot. En dicho ciclo, haciendo uso tanto de la primera como de la segunda ley de la termodinámica, se obtiene que el máximo trabajo extraíble de un ciclo trabajando entre dos focos de temperatura  $T_H$  y  $T_C$  es el siguiente:

$$W = Q_H \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \quad (2)$$

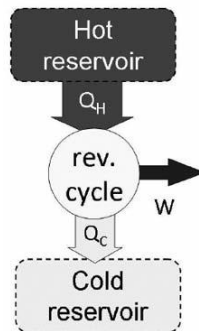


Ilustración 1: esquema de un ciclo térmico de potencia reversible <sup>[6]</sup>.

Para el cálculo de la exergía de calor se asume que el ambiente, de temperatura  $T_0$ , es uno de los focos. Que sea el foco caliente o el frío dependerá de la temperatura del calor disponible. Si el calor analizado tiene una temperatura mayor que  $T_0$  ( $T > T_0$ ), este calor se corresponderá con  $Q_H$ , actuando el ambiente como foco frío (ver esquema izquierdo de la ilustración 2). Por tanto, este calor puede ser convertido a trabajo: contiene exergía convertible a trabajo  $W$ .  $Q_C$  no se conoce, depende de las temperaturas, con lo que esa exergía dependerá también de las temperaturas:

$$W = Q_H \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \quad (3)$$

Si, por el contrario, el calor analizado está a una temperatura  $T < T_0$ , dicho calor es en realidad un “frío” disponible, entendiendo “frío” como una falta de energía térmica. El calor (frío) analizado será entonces  $Q_C$  y el ambiente actuará como foco caliente (ver esquema derecho de la figura ilustración 2). La exergía del frío disponible  $Q_C$  será:

$$W = Q_C \left(1 - \frac{T_0}{T_C}\right) \quad (4)$$

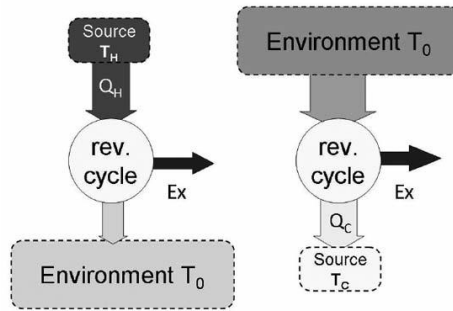


Ilustración 2: relación entre un ciclo térmico de potencia reversible y la exergía de calor <sup>[6]</sup>.

El factor  $(1 - \frac{T_0}{T})$  de las ecuaciones anteriores se denomina factor de calidad del calor, y se define como el contenido de exergía de un calor dividido por el contenido de energía. Indica por tanto la calidad de ese calor. La siguiente figura muestra la variación de dicho factor en función de la temperatura de un calor, suponiendo la temperatura del ambiente de referencia  $T_0=25^\circ\text{C}$ .

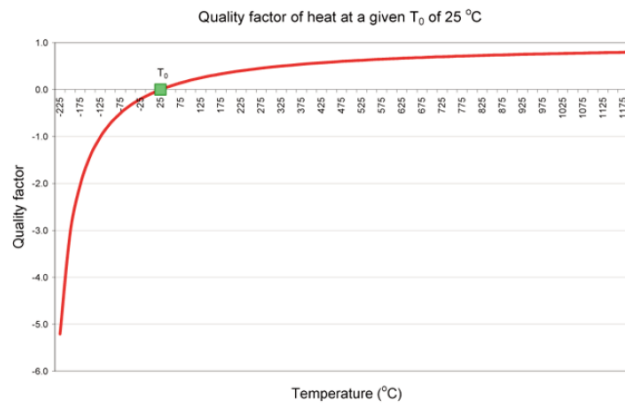


Gráfico 1: evolución del factor de calidad de un calor en función de su temperatura <sup>[6]</sup>.

Se observa que para temperaturas de calor menores a la temperatura ambiente, el factor de calidad es negativo. En estos casos, lo que se tiene en realidad es un “frío”, cuya temperatura es menor a la del ambiente y por lo tanto el resultado de  $T_0/T$  mayor que la unidad en la ecuación 3. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en esa misma ecuación  $Q_C$  es negativo, ya que se trata de un calor que sale del sistema del ciclo reversible, y por lo tanto la exergía será siempre positiva. En otras palabras: cuando existe un frío disponible existirá siempre posibilidad de realizar trabajo <sup>[6]</sup>.

De la figura previa se concluye que cuanto mayor temperatura tenga un calor, mayor será su contenido en exergía. A temperaturas muy altas, el factor de calidad se acerca a uno, lo que significa que la exergía que contiene es igual a su energía y por lo tanto toda su energía puede convertirse en trabajo.

Hasta ahora se ha hecho referencia al contenido en exergía que corresponde a un calor. Sin embargo, dependiendo de la dirección de ese flujo de calor y de las temperaturas del sistema y del ambiente, ese calor tendrá la capacidad de realizar trabajo o, por el contrario, requerirá de una entrada de trabajo. La siguiente figura muestra un esquema de esa dependencia, en el que el signo negativo significa que la exergía o el calor se extraen del sistema y el signo positivo hace referencia a los flujos que entran en él.

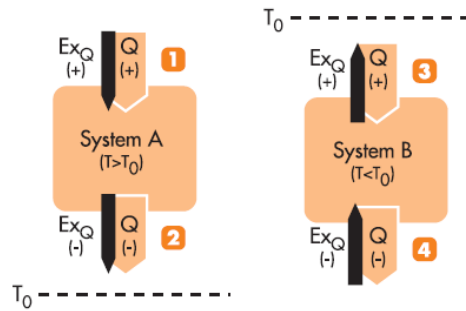


Figure 2.6: Direction of the exergy transfer related to energy transfer and temperatures  $T$  and  $T_0$ .

**Ilustración 3: dirección de la transferencia de exergía en relación a la transferencia de calor y las temperaturas  $T$  y  $T_0$  [6].**

En resumen, un flujo de calor que conlleve un acercamiento del sistema al ambiente de referencia, llevando  $T$  hacia  $T_0$ , puede teóricamente producir trabajo. Por el contrario, si un flujo aleja al sistema del estado de referencia, ese flujo requerirá entrada de trabajo. El primer flujo se dará por tanto de forma espontánea, mientras que este último corresponderá a flujos de calor no espontáneos.

### 3.1.3. Exergía de la materia

Previamente, se ha expuesto la exergía asociada a un calor. En este punto, se resumirán la formulación a aplicar para el cálculo de la exergía contenida en un flujo másico, es decir, contenida en una cantidad de materia que no está en equilibrio con el ambiente.

Se ha mencionado previamente que la exergía que se considerará en el presente trabajo será la exergía física. Para su cálculo, se utilizará la siguiente expresión:

$$b^{ph} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

Siendo  $b^{ph}$  la exergía específica (kJ/kg), definida en función de la entalpía y entropía del estado en el que se encuentra esa materia, así como la entalpía y entropía que se tendrían con esa materia en las condiciones del estado de referencia (definidas por el subíndice "0"). A su vez,  $T_0$  hace referencia a la temperatura del estado de referencia. Se observa, por lo tanto, que la exergía es una propiedad termodinámica.

Por otro lado, para el caso concreto de los flujos combustibles se ha mencionado que se considerará también su exergía química. Existen diversos métodos de cálculo de la exergía química específica de una materia [7]. Sin embargo, en el caso particular de los combustibles industriales esta última puede determinarse, de manera rápida y aproximada, mediante coeficientes empíricos  $f_l$  y  $f_h$  [8]:

$$b^{ch} = f_l \cdot LHV = f_h \cdot HHV \quad (6)$$

Siendo LHV y HHV el poder calorífico inferior y superior, respectivamente.

Esto puede hacerse porque los combustibles gaseosos tienen generalmente valores de exergía química específica similares a su poder calorífico inferior, mientras que en los sólidos y líquidos la exergía química específica se aproxima a su poder calorífico superior, por lo que los coeficientes empíricos mencionados se aproximan a la unidad [8].

Para el caso concreto del presente trabajo, se tendrá gas natural, un combustible gaseoso, y por lo tanto se considerará un valor de  $f_i$  típico de 1,05. Así, puede realizarse la siguiente simplificación:

$$b = b^{ph} + b^{ch} \approx b^{ph} + 1,05 \cdot LHV \approx 1,05 \cdot LHV \quad (7)$$

### 3.2. Métodos de análisis exergético

La demanda de exergía de un edificio se calcula a partir de los resultados de la demanda de energía, obtenidos mediante la aplicación de la ecuación del balance energético. Para realizar este paso, es necesario determinar la calidad de esa energía demandada. Existen principalmente dos métodos.

#### 3.2.1. Método simplificado

Es el desarrollado por Schmidt<sup>[9]</sup>. En este método se asume que la demanda de energía tiene calidad de calor a temperatura de la zona térmica. De esta manera, la demanda de exergía puede calcularse multiplicando la demanda de energía por el factor de calidad del calor.

$$B_{dem} = \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right) Q_{dem} \quad (8)$$

Suele considerarse que  $T_i$  se corresponde con la temperatura del aire interior. Sin embargo, la temperatura superficial media de las paredes es diferente a la del aire. Por ello, para este cálculo también puede usarse la temperatura operativa, que sería una temperatura efectiva ponderada a partir de ambas temperaturas, tanto la del aire como la media de las paredes.

Las características de este método son las siguientes:

- Sólo considera la componente térmica de la demanda de energía, sin considerar la componente química y la debida a la presión. Esto es razonable siempre que no exista humidificación.
- El cálculo se basa en la ecuación de la exergía correspondiente a una transferencia de calor convectiva. En realidad, parte de la demanda de energía se suministra como calor convectivo y la restante como calor de radiación, siendo el factor de calidad de un calor y otro diferente. Por lo tanto, a pesar de que los sistemas no son 100% convectivos, la demanda de exergía se calculará como si lo fueran.
- Considera que toda la energía es suministrada como calor a la temperatura de la zona térmica considerada. Esta sería la temperatura límite a la que la energía podría ser suministrada a dicha zona térmica. Obvia, sin embargo, que parte de la energía es requerida para calentar el aire de ventilación.

#### 3.2.2. Método detallado

Al igual que el método anterior, este método no incluye la humidificación e ignora la diferencia entre la exergía de calor convectivo y la de radiativo.

Sin embargo, este método diferencia entre la parte de la demanda de energía utilizada para calentar el aire de ventilación y la parte requerida para compensar las pérdidas de calor. La razón es que el factor de calidad de la energía térmica de la materia a una temperatura  $T$  es menor que aquel del calor a una temperatura  $T$ : idealmente se requiere menor trabajo para incrementar la energía térmica de la materia de  $T_o$  a  $T$ , que para suministrar la misma cantidad de energía en forma de calor a una temperatura  $T$ .



Es necesario, por lo tanto, un criterio lógico para dividir la demanda energética y definir qué parte está asociada con el aire de ventilación, entrante, y que parte es necesaria para compensar las pérdidas de calor. Al ser la demanda ideal de exergía el mínimo trabajo necesario para proveer la energía requerida, la demanda de exergía debiera ser asignada al precalentamiento máximo posible del aire de ventilación. La restante demanda de exergía será suministrada como calor a la temperatura operativa de la zona térmica.

### **3.2.3. Evaluación cuasi-estacionaria**

La exergía es un parámetro que depende tanto del sistema analizado como del estado del ambiente de referencia. Este ambiente de referencia suele definirse como el aire exterior. Por lo tanto, los flujos de exergía serán sensibles a las variaciones de las condiciones de ese ambiente exterior.

Cuando las variables del sistema estudiado y aquellas del estado de referencia no difieren mucho unas de otras, como es el caso de la calefacción de espacios en la edificación, esa sensibilidad es significativa y debe considerarse. Esto significa que en un análisis exergético en estado estacionario es obligatoria una estimación del error cometido respecto al enfoque dinámico<sup>[6]</sup>.

Por otro lado, un análisis dinámico requiere un alto nivel de detalle y complejas ecuaciones.

Alternativamente, puede realizarse un análisis en estado cuasi-estacionario, lo que representa un híbrido entre ambos enfoques previos, el estacionario y el dinámico. Los flujos de exergía se evalúan siguiendo el modelo estacionario, pero dichos flujos se analizan para periodos de tiempo discretos continuos, de manera que se tienen en consideración los fenómenos de almacenamiento.

La concordancia entre este último método y el análisis estacionario, realizado este adoptando la temperatura exterior media mensual, se limita a los meses en los que el sistema de calefacción está en funcionamiento la mayor parte del tiempo o la demanda de calor es alta. Sin embargo, en los meses en los que el sistema funciona durante una pequeña fracción del tiempo, puede obtenerse un resultado muy diferente con cada método<sup>[10]</sup>.

Esto último es coherente con las conclusiones de Sakulpipatsin<sup>[11]</sup>, quien afirma que la diferencia entre los resultados de los análisis anuales estacionario y cuasi-estacionario es menor del 10% en climas fríos y templados.

Por lo tanto, a pesar de que para climas fríos una primera estimación estacionaria de los flujos de exergía pudiera ser razonable, el error cometido mediante este método estacionario será mayor cuanto más templadas sean las condiciones climáticas de la localización del edificio estudiado.

Es por todo ello que en el presente trabajo el tipo de análisis desarrollado será el cuasi-estacionario.

### **3.3. Análisis termoeconómico**

Un mayor desarrollo de los análisis energéticos requiere de herramientas capaces de hacer frente a retos como una evaluación y asignación racional del coste de los productos de sistemas energéticos, diagnósticos de su operación u optimización de sus componentes. La

Termoeconomía puede considerarse como una nueva ciencia que, conectando la Termodinámica con la Economía, proporciona estas herramientas <sup>[12]</sup>.

Una vez definido el concepto de exergía, resulta lógico afirmar que en sistemas de energía “exergía” y “costes” son dos ideas relacionadas o, en otras palabras, la segunda ley de la termodinámica debe interconectarse con el coste de producción de un flujo energético <sup>[13]</sup>.

Todo proceso real en un sistema de energía es no reversible y por lo tanto se destruye una cantidad de exergía, consumiendo para siempre un recurso natural y creando un “coste” asociado a ese recurso <sup>[13]</sup>. Porque todo recurso natural tiene un coste económico y cuanto más irreversible sea un proceso, mayor será ese recurso consumido y el coste asociado al producto de ese proceso.

Si se es capaz de medir ese coste termodinámico, identificando, localizando y cuantificando las causas de las ineficiencias de un proceso real, se obtiene una base objetiva para la asignación de costes económicos <sup>[14]</sup>.

A lo largo de los últimos 20 años se han desarrollado diversas metodologías termoeconómicas, por lo que pueden encontrarse tantas nomenclaturas, conceptos y nombres como métodos existen. Esta puede ser una de las razones que impiden un desarrollo más rápido de la Termoeconomía.

### 3.3.1. Métodos termoeconómicos

Existen dos grandes grupos de métodos termoeconómicos <sup>[12]</sup>.

Por un lado, el primer grupo puede definirse como “**Métodos de contabilidad de coste**”. En ellos, se usan los costes medios como base para una evaluación racional de precio.

En este grupo se sitúa el método **Exergy Cost Theory (ECT)** que se aplicará en el análisis del presente trabajo.

También se tiene el **LIFO: Last In First Out**, en el que subyace la idea de que el coste al que se provee exergía a un flujo es dependiente de la presión y temperatura a las que el proceso tiene lugar, representadas por la exergía física específica. Cuando se remueve exergía del flujo, se asume que esa exergía removida es la última exergía suministrada, al coste al que fue proveída. Por lo tanto, es necesario conservar la “historia” de las adiciones de exergía.

El **AVCO approach** es similar al LIFO, y solo se diferencia de él en la serie de ecuaciones auxiliares necesarias para calcular los costes <sup>[12]</sup>.

Por otro lado, están los “**Métodos de optimización**”, que hacen uso de los costes marginales para minimizar los costes de los productos de un sistema. El método más aplicado dentro de este grupo es el **Thermoeconomic Functional Analysis, TFA**.

Sin embargo, todas las metodologías presentadas, debido a que sus modelos termoeconómicos pueden ser linealizados, pueden ser tratadas con un mismo formalismo matemático, proporcionado por la **Teoría Estructural de la Termoeconomía**. Esta última, desarrollada por Valero <sup>[13]</sup>, ofrece un lenguaje o formulación matemática común que sirve para ambos grupos de métodos.

De este modo, permite una comparación entre las distintas metodologías. Comparación que muestra que las diferencias entre ellas son básicamente el nivel de agregación empleado en el análisis y la manera de distribuir los recursos del sistema entre los distintos componentes.

Con la Teoría Estructural, mediante cuatro premisas generales se obtienen una serie de ecuaciones características que modelan el comportamiento del sistema, a partir de las cuales se obtienen a su vez las ecuaciones de coste <sup>[13]</sup>. El método de cálculo de coste se basa en reglas de derivación matemática que se aplican a esas ecuaciones características. Por lo tanto, cuanto mayor información física contengan dichas ecuaciones y más realista sea esta, mayor significado físico contendrán los costes obtenidos.

### 3.3.2. Teoría del Coste Exergético

El problema fundamental de la asignación de costes puede enunciarse de la siguiente manera: para un sistema dado, definidos sus límites y nivel de desagregación, que define los subsistemas que lo constituyen, cómo obtener el coste de cada flujo interrelacionado en esa estructura <sup>[15]</sup>.

#### 3.3.2.1. Estructura física de un sistema

El sistema queda definido por tanto por una serie de subsistemas (unidades, componentes) unidos unos a otros y al ambiente por otra serie de flujos de materia, calor y trabajo. En resumen, se tiene:

$$\text{Sistema energético} = \text{Subsistemas} + \text{Flujos de materia o energía} \quad (9)$$

La relación entre los  $n$  subsistemas y  $m$  flujos se establece mediante la matriz de incidencia  $A_{n \times m}$ . En dicha matriz, cada fila corresponderá a un subsistema o componente, siendo cada columna perteneciente a uno de los flujos del sistema. De esta manera, cada elemento  $a_{ij}$  de la matriz tomaría un valor de +1, -1 o 0, dependiendo si el flujo  $j$  entra, sale o no guarda relación física con el componente  $i$ .

De esta manera, los balances de masa, energía y exergía pueden escribirse de la siguiente manera, donde  $M$ ,  $E$  y  $B$  son vectores columna de dimensión  $m$  cuyos elementos corresponden a la masa, energía y exergía de cada flujo:

$$AxM = (0) ; AxE = (0) ; AxB = D \quad (10)$$

En el vector columna  $D$  de dimensión  $n$ , cada elemento  $D_i$  representa la exergía destruida en la unidad  $i$  debido a irreversibilidades internas. Si bien los dos primeros balances anteriores suelen utilizarse para comprobar que los flujos másicos y energéticos considerados, estos últimos calculados a partir de datos termodinámicos, son correctos, el último balance sirve para conocer los valores de exergía destruida en cada equipo, una vez que se calculan los flujos de exergía mediante la formulación descrita en un punto anterior.

Por ello, una definición más detallada de la matriz de incidencia permite analizar con mayor profundidad las causas de la ineficiencia de la instalación. Sin embargo, es necesario encontrar un nivel óptimo de agregación, puesto que cuanto más detallada sea la matriz, mayor será el número de mediciones físicas a realizar en el sistema y la complejidad del cálculo.

### 3.3.2.2. Estructura productiva de un sistema

En realidad, un sistema es algo más que una serie de subsistemas y flujos, porque cada subsistema tiene una función particular que contribuye a alcanzar el objetivo productivo final de dicho sistema. Por ello, en cada subsistema o unidad, los flujos pueden definirse como producto de dicha unidad (P), recurso o fuel consumido por dicha unidad (F) o pérdidas (L) que dejan el subsistema sin ser posteriormente usadas. Esta definición debe cumplir tres condiciones:

- Todo flujo debe estar presente y utilizarse en dicha definición una sola vez.
- Todos los componentes P, F y L tienen exergía cero o positiva.
- Debe cumplirse el siguiente balance de exergía en la unidad:

$$F - P - L = D \quad (11)$$

Será a partir de esta definición de combustible, producto y pérdida como podrá calcularse el rendimiento exergético de cada equipo.

### 3.3.2.3. Coste exergético

De aquí en adelante se utilizará la terminología  $B^*$  para designar el coste exergético de un flujo, definido como la cantidad de exergía necesaria para producirlo. Nótese que, si bien la exergía es una propiedad termodinámica, el coste exergético está relacionado con los procesos sufridos previamente por esa cantidad de exergía.

A partir de esa definición, se denomina coste exergético unitario de un flujo a la cantidad de exergía necesaria para producir una unidad de exergía de dicho flujo. Por tanto, se tiene que:

$$k_i^* = \frac{\dot{B}_i^*}{\dot{B}_i} > 1 \quad (12)$$

Por definición, el coste exergético unitario será siempre mayor que uno, ya que el coste exergético de un flujo será siempre mayor que su exergía. Sin embargo, en ausencia de evaluaciones externas, la segunda proposición definida posteriormente será una excepción a esta afirmación.

Valero formuló un procedimiento racional para determinar los costes, basado en las siguientes cuatro proposiciones <sup>[16]</sup>:

- **P1:** El coste exergético es una propiedad conservadora, por lo que se pueden formular tantos balances de coste exergético como equipos o subsistemas haya en un sistema.
- **P2:** En ausencia de una evaluación externa, el coste exergético de los flujos que entran a un sistema es igual a su exergía ( $B_i^* = B_i$ ). Esto permite formular tantas ecuaciones como flujos entrantes al sistema se tengan.
- **P3:** Todos los costes generados en el proceso deben asignarse a los productos finales. Significa que en ausencia de evaluaciones externas, debe asignarse un valor cero al coste de las pérdidas ( $L_i^* = 0$ ), de manera que para cada unidad se cumpla  $F_i^* = P_i^*$ . Esto permite formular tantas ecuaciones como flujos de pérdidas existan.

Si todas las unidades tienen un solo flujo saliente que no sea pérdida, las proposiciones presentadas proporcionan  $m$  ecuaciones, que son suficientes para resolver el problema. En caso contrario, se requiere de ecuaciones adicionales que proporciona la cuarta proposición.

- **P4:** Si un flujo saliente de una unidad es parte del fuel entrante a esa unidad, su coste exergético unitario es el mismo que el del flujo entrante del que es parte. Si el producto de una unidad se compone de diversos flujos, se asigna el mismo coste exergético unitario a todos ellos, puesto que su proceso de formación es inseparable e indistinguible mediante el nivel de agregación considerado.

Se obtienen, por lo tanto, una serie de ecuaciones

Es interesante, con el fin de poder expresar de manera compacta las ecuaciones obtenidas de cada una de las proposiciones anteriores, utilizar notación matricial. De esta manera, la primera proposición nos proporciona el siguiente sistema de n ecuaciones:

$$AxB^* = (0) \quad (13)$$

Siendo A la matriz de incidencia y  $B^*$  el vector columna de costes exergéticos. Recordemos en este punto que los valores de exergía de cada flujo se deben calcular previamente, a partir de datos termodinámicos y la formulación presentada anteriormente. Así, las incógnitas en este punto son los costes exergéticos de los flujos.

Para la resolución del sistema de ecuaciones, serán necesarias las (m-n) ecuaciones auxiliares restantes, que provienen de la aplicación de las últimas tres proposiciones. Para expresarlas matricialmente, se hace uso de la llamada “matriz de producción”,  $\alpha$ , y el vector columna  $\omega$ , de manera que:

$$\alpha x B^* = \omega \quad (14)$$

El sistema de ecuaciones a resolver, de forma compacta, queda de la siguiente manera:

$$\mathbb{A}x B^* = \mathbb{Y}^* \quad (15)$$

Siendo  $\mathbb{A} = [A|\alpha]^t$  y  $\mathbb{Y}^* = [0|\omega]^t$ . A partir de los costes exergéticos de los flujos obtenidos de la resolución del sistema, pueden calcularse los costes exergéticos unitarios directamente.

#### 3.3.2.4. Coste exergoeconómico

Hasta ahora, se ha hecho referencia al coste exergético de los flujos internos de un sistema. Es decir, a su coste de obtención en exergía. Sin embargo, en la realidad, los costes de producción de las diferentes unidades del proceso de producción estarán ligados al coste monetario de los flujos que existen. Para la obtención de estos costes monetarios, que son el equivalente a los costes exergéticos pero en términos de dinero (y no exergía), se sigue la misma metodología descrita previamente, pero con algunas diferencias.

En cuanto a la nomenclatura, los costes exergoeconómicos se denominarán con la letra mayúscula C, mientras que el coste exergoeconómico unitario se representará con la letra minúscula c. De esta manera, las equivalencias respecto al coste exergético quedarían:

$$C_i \equiv B_i^* \text{ y } c_i \equiv k_i^* \quad (16)$$

La formación del coste económico de un flujo está relacionado no solo con la eficiencia termodinámica del proceso que sufre, sino también con la depreciación y el coste de mantenimiento de las unidades o subsistemas por los que pasa.

Es decir, el coste exergoeconómico de un flujo se define como la cantidad de recursos, evaluados en unidades monetarias, requeridos para obtener dicho flujo. Esos recursos son una combinación de dos contribuciones: por un lado, el coste monetario de la exergía de los flujos entrantes al sistema y necesarios para producir el flujo analizado y, por otro, el resto de costes generados en el proceso productivo (capital, mantenimiento...).

De esta manera, a la hora de aplicar la primera proposición presentada previamente, esta vez en términos monetarios y no exergéticos, se tendrá:

$$Ax C = -Z \quad (17)$$

Cada término  $Z_i$  del vector columna  $Z$  (que sustituye al vector nulo que se tiene en términos exergéticos) es el denominado “coste nivelado” del subsistema  $i$ , que agrupa todos sus costes de adquisición, depreciación, mantenimiento, etc. Debe considerarse que en términos monetarios es un flujo de entrada al sistema.

Por otro lado, cuando se aplica la segunda proposición, deben considerarse los costes monetarios de los flujos entrantes al sistema (el coste del gas natural alimentado a una caldera, por ejemplo). Por lo que las ecuaciones que se obtienen de dicha proposición quedan:

$$\alpha x C = C_e \quad (18)$$

Siendo  $C_e$  los costes de los flujos entrantes. Finalmente, el sistema que se obtiene, en forma compacta, es el siguiente:

$$Ax C = z^* \quad (19)$$

Siendo  $z^* = [-Z|C_e|0]^t$ .

Por último, una vez obtenidos tanto el coste exergético como el exergoeconómico de cada flujo, puede calcularse el llamado factor exergoeconómico de cada componente. Este factor es el ratio entre el coste de inversión del componente y el impacto total del componente en los costes:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \hat{C}_{D,k}} \quad (20)$$

Siendo  $\hat{C}_{D,k}$  el coste de la exergía destruida en el componente  $k$ . Para su cálculo, puede considerarse que el coste unitario es el mismo que el del fuel de ese combustible, por lo que se calcularía de la siguiente manera:

$$\hat{C}_{D,k} = c_F \cdot \dot{D}_k \quad (21)$$

Por lo tanto, el factor exergoeconómico nos permite valorar cual es la principal fuente del coste en un componente. Si el factor es cercano a uno, la principal fuente del coste es a inversión realizada en la compra del equipo. Si, por el contrario, el factor exergoeconómico es pequeño, teóricamente es conveniente invertir capital en mejorar su eficiencia, ya que la principal fuente del coste no es el equipo, sino las irreversibilidades que tienen lugar en él.

### 3.3.2.5. Coste exergético acumulado

Nótese que en el caso previo correspondiente a los costes exergéticos, no se ha considerado el hecho de que las unidades o subsistemas que forman un sistema son de por sí productos

funcionales. Quiere decir que ellos mismos tienen su propio coste exergético, que hace referencia a toda la exergía que se consume necesariamente a lo largo del ciclo de vida de dicho producto.

Una vez se determina dicho coste exergético, es necesario distribuirlo a lo largo de la vida del producto, de manera que puedan obtenerse los valores de “amortización exergética”. Estos valores se introducen en los balances exergéticos de la primera proposición de manera análoga a los costes nivelados en el análisis económico.

## 4. Beneficios del proyecto. Importancia del análisis exerético

La edificación juega un papel importante en el consumo energético mundial, teniendo una gran influencia tanto en el consumo de los recursos naturales como en las emisiones emitidas. Actualmente la contribución de la edificación en el consumo global de energía es del 40% [6], y continua incrementándose estos años debido al crecimiento demográfico y la creciente demanda de espacios interiores saludables.

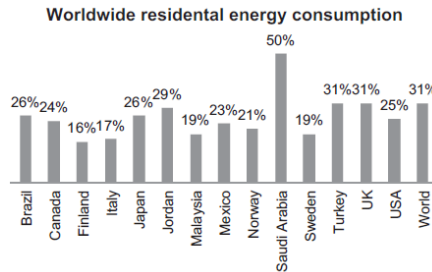


Gráfico 2: consumo energético residencial en el mundo [4].

La mayor parte de la energía requerida en el sector de la edificación es utilizada para mantener la temperatura de la zona térmica alrededor de los 20°C. Esto significa que los niveles de temperatura necesarios para calefacción y refrigeración de espacios interiores son bajos. Por lo tanto, la calidad de la energía que demandan estas aplicaciones de acondicionamiento de espacios será también pequeña, de alrededor de un 7% de contenido exerético [17].

Sin embargo, cada aplicación energética y dispositivo consumidor de energía de un edificio requerirá de un diferente nivel de exerjía. De esta manera, si consideramos la producción de ACS a una temperatura de alrededor de 55°C, la calidad de la energía requerida será ligeramente mayor que el acondicionamiento de espacios, necesitándose un contenido exerético de alrededor del 15%. Dicho contenido será aún superior para cocinar (28%), y alcanzará el nivel máximo de calidad para electrodomésticos e iluminación (100%) [6].

Actualmente, la estructura del suministro de energía a la edificación no es tan sofisticada como las demandas energéticas comentadas. Generalmente, la energía se suministra en forma de electricidad o combustible fósil, lo que significa una alimentación con contenido exerético constante, de alrededor del 100%. Esta calidad de la energía es innecesariamente alta, como ilustra la ilustración 4. Un caso paradigmático es el de las calderas, cuyo rendimiento exerético es alarmantemente bajo. A pesar de que el rendimiento energético es cercano al 100%, el rendimiento exerético alcanza como mucho el 10% [17].

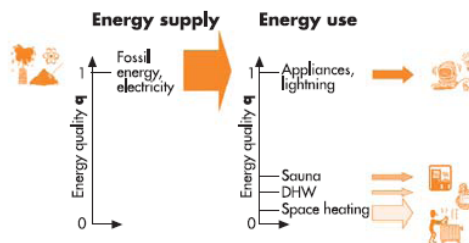


Ilustración 4: comparativa de la calidad energética demandada por cada uso [6].

Se observa por tanto la necesidad de adaptar los niveles suministrados de calidad de la energía a los demandados, de manera que los recursos se consuman eficientemente. Es necesario, por tanto, ir un paso más allá de los múltiples análisis cuantitativos realizados hasta la fecha, y



considerar también los aspectos cualitativos de la demanda y suministro energéticos. No solo considerar la energía contenida en los flujos, sino los tipos de flujos energéticos que existen.

El análisis exergético promueve por tanto un suministro de energía eficiente, siendo esto válido también a la hora de evaluar los recursos renovables. Estos recursos, algunos de los cuales tienen un alto potencial termodinámico, también deben ser utilizados de manera eficiente.

Para ello, es necesaria una mayor comprensión de los flujos energéticos y procesos de conversión de energía que tienen lugar en los edificios, profundizando en ellos de manera que los diseñadores estén en disposición de lograr un diseño óptimo en conjunto. La ilustración 5 muestra un esquema de utilización eficiente de flujos energéticos.

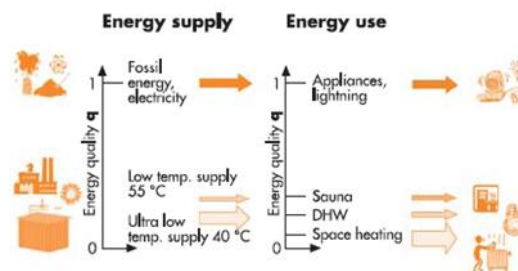


Ilustración 5: esquema óptimo de abastecimiento energético en función del uso.

Se observa, por tanto, la importancia de hacer uso de fuentes de energía de baja temperatura a la hora de satisfacer las demandas de calor en edificios. Estudios recientes muestran que cuando se aplican sistemas de baja temperatura a los edificios, el confort térmico mejora <sup>[2]</sup>. Es importante promover un uso eficiente de los combustibles. En este marco, deberían fomentarse sistemas de cogeneración en detrimento de sistemas tipo calderas energéticamente eficientes, que deberían desestimarse.

En resumen, los beneficios del análisis exergético son los siguientes <sup>[5]</sup>:

- Revela cuanto es posible mejorar el diseño de un sistema de energía, reduciendo las irreversibilidades existentes.
- Permite determinar la localización, el tipo y la verdadera magnitud de las pérdidas en un sistema.
- Es una herramienta clave de cara a alcanzar un desarrollo sostenible, ya que permite reducir el consumo primario de recursos.
- Es la herramienta principal para evaluar el impacto medioambiental derivado de la utilización de un recurso energético.

## 5. Estado del arte

La revisión que a continuación se realiza se refiere a la utilización de la exergía en el ámbito de la edificación y se ha estructurado clasificando las referencias en tres grandes bloques:

- Trabajos que consideran la exergía y el sector de la edificación en global, extendiendo en algunos casos el análisis a un ámbito mucho más amplio.
- Trabajos referidos a las instalaciones de los edificios en particular.
- Trabajos referidos a la envolvente de los edificios.

### 5.1. Consideración del sector de la edificación en global

En el primero de los grupos destaca por su carácter pedagógico, muy adecuado para un primer acercamiento al problema, el libro de Shukuya (Shukuya 2013). Otros trabajos interesantes por haber visibilizado el uso de la exergía más allá del ámbito industrial, son los realizados por Wall desde los años 90 sobre el uso de la exergía en diferentes sectores aplicados a diversos países (Wall 1990; Wall, Sciubba, Naso 1994).

Estos trabajos han sido posteriormente el punto de partida para los trabajos de otros autores (Dincer, Hussain, Al-Zaharnah 2004; Ertesvag 2001; Utlu and Hepbasli 2006), que han analizado el rendimiento exergético de diferentes sectores en países como Noruega, Japón, Italia, EEUU, Canadá, Brasil, Turquía, Arabia Saudí, etc. Como conclusión más importante en relación a los valores de rendimientos exergéticos obtenidos para el sector residencial – comercial cabe destacar que aunque dependen de cada país concreto, todos en general presentan valores pequeños, oscilando entre el 2 y el 15 % (Ertesvag 2001).

Dentro de este grupo se incluyen también trabajos que aplican la exergía sobre el urbanismo y la planificación urbana para tratar de lograr la sostenibilidad. La relación de la exergía con ese ámbito puede que no sea evidente a primera vista, ya que tradicionalmente el análisis exergético se ha desarrollado como mucho hasta la escala de edificio individual. No obstante, si se considera el potencial de mejora que se consigue al analizar toda la cadena de suministro energético completa (desde la energía primaria hasta la satisfacción de las demandas), queda patente la utilidad de la exergía como parámetro en la toma de decisiones sobre el planeamiento y el urbanismo a escala regional. El uso de la exergía permite un mejor uso de las diferentes calidades de la energía, proporcionando nuevas oportunidades de ahorro de energía (Gommans and Dobbelsteen 2007).

Sobre esta temática, uno de los grupos más importantes es el formado por diversas universidades holandesas, dentro del proyecto SREX (SREX 2012). Entre sus contribuciones se encuentran tanto estudios de carácter general como la anterior referencia (Dobbelsteen et al. 2007a; Dobbelsteen et al. 2007b; Gommans 2009; Stremke 2010; Stremke, Dobbelsteen, Koh 2011), así como estudios aplicados a casos concretos (Gommans and Van Kann 2009; Stremke 2009; Stremke and Koh 2011).

Otros autores, han extendido la relación entre la exergía y la eficiencia energética de los edificios a un concepto más amplio, incluyendo aspectos medioambientales. Esto ha dado lugar a la disciplina denominada “environomics”, cuyos máximos exponentes son los trabajos recogidos en (Frangopoulos 1992; Frangopoulos and Spakovsky 1993; Spakovsky and Frangopoulos 1993).

## 5.2. Análisis de instalaciones de edificios

El segundo de los bloques, el relativo al análisis de los diferentes componentes de los sistemas energéticos del edificio, constituye el más numeroso en cuanto a número de referencias. La razón principal probablemente sea su fácil extrapolación desde las aplicaciones industriales. Así, resulta fácil encontrar trabajos relativos a prácticamente todos los tipos de sistemas, con fuentes de energía tanto convencionales como renovables.

Entre los más importantes destacan los que analizan sistemas HVAC (Sakulpipatsin et al. 2010), sistemas de calefacción (Shukuya 1994; Asada and Boelman 2004), sistemas de almacenamiento de energía térmica (Dincer 2002), sistemas de bomba de calor (Hepbasli 2007; Torio, Angelotti, Schmidt 2009), sistemas de calentamiento de agua mediante energía solar (Gunerhan and Hepbasli 2007), intercambiadores de calor (Boelman and Sakulpipatsin 2004), etc. Por su parte, en (Torio 2012) se utiliza la exergía para comparar y optimizar diferentes sistemas de suministro energético en edificios.

En general, en todos ellos se ponen de manifiesto los bajos rendimientos exergéticos de los sistemas térmicos habituales. A modo de ejemplo se encuentran: un 3,4 % para sistemas de aire acondicionado (Dincer, Hussain, Al-Zaharnah 2004), entre el 2,5 y el 7,4 % para sistemas de calefacción y entre el 3,2 y el 10,8 % para sistemas de producción de agua caliente (Utlu and Hepbasli 2006), o el 8,7 % para calderas de condensación (Yildiz and Güngör 2009).

La mayoría de estos trabajos consideran condiciones constantes para el ambiente de referencia. No obstante, existen algunas referencias que al menos han analizado mediante estudios paramétricos cómo varía el rendimiento exergético de las instalaciones en función del valor de la temperatura del estado de referencia (Ozgener, Hepbasli, Dincer 2006; Utlu and Hepbasli 2007; Caliskan and Hepbasli 2010).

Afortunadamente, recientemente varios autores han empezado a considerar condiciones variables en sus análisis, destacando los trabajos realizados en (Sakulpipatsin et al. 2008; Lohani 2010; Zhou and Gong 2013).

Con objeto de facilitar el análisis exergético en el sector de la edificación, se han desarrollado varias herramientas para el cálculo de la demanda de energía y exergía en los edificios. La mayoría, a partir del año 2000, impulsadas por el grupo de trabajo “Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings” de la Agencia Internacional de la Energía (Annex 37 2003; Ala-Juusela 2004), continuados posteriormente por la red de sistemas de baja exergía en edificios (LowEx.Net 2008) y por el grupo de trabajo del Annex 49 “Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities” hasta 2010 (Annex 49 2010).

De entre ellos destaca la herramienta de prediseño creada para el análisis exergético de los sistemas de calefacción y ACS de un edificio (Sakulpipatsin, Boelman, Schmidt 2005; Schmidt 2004), aunque únicamente contempla el régimen estacionario.

## 5.3. Trabajos referidos a la envolvente de edificios

El tercer grupo, el de los trabajos referidos a la envolvente de los edificios, es sin duda el más reducido. Existen muy pocos trabajos que cuantifiquen los efectos que las características térmicas de la envolvente tienen en la demanda de exergía.

El más interesante corresponde a (Nishikawa and Shukuya 1999). En él, los autores utilizan la exergía acumulada en la envolvente para estudiar diferentes estrategias de enfriamiento pasivo. Entre otras referencias interesantes de estos autores, en la misma línea que la anterior, se encuentran (Shukuya 1994; Shukuya 1996; Shukuya and Hammache 2002).

Entre el resto de trabajos se encuentra (Dovjak et al. 2010), donde se comparan los efectos en la reducción del consumo de exergía al mejorar el aislamiento de la envolvente y el rendimiento de la caldera. La mayor limitación de este trabajo es que no considera el régimen dinámico.

Schweiker por su parte, también analiza la demanda de exergía ante diferentes características de la envolvente, pero incluyendo como variable el comportamiento de los inquilinos a la hora de usar los equipos de climatización y fijar las consignas de temperatura (Schweiker and Shukuya 2010).

En cuanto a las referencias relativas a casos prácticos de estudio, en general casi ninguna de ellas se centra exclusivamente en la envolvente como tal, tratando de identificar el efecto que las propiedades térmicas tienen en la demanda de exergía. La mayoría únicamente considera la envolvente como un elemento más de la cadena energética, que debido a sus características térmicas da lugar a una mayor o menor demanda de energía y exergía. Dada la gran variedad de sistemas térmicos analizados, unido a la diferente tipología de edificios, resulta difícil extraer conclusiones globales.

## 6. Edificios de bajo consumo exergético: edificios LowEx

A partir de la información que puede extraerse del análisis exergético, ha surgido una nueva filosofía de construcción que no trata únicamente de disminuir la demanda energética (cuyo máximo exponente son los edificios de consumo casi nulo), sino que además busca satisfacer de la manera más eficiente posible la demanda final.

A lo largo de dos décadas, se han concebido, desarrollado e implementado medidas, llamadas “de ahorro energético”, tanto en la envolvente como en la instalación de edificios. Estas medidas pueden dividirse entre sistemas pasivos y sistemas activos.

Los sistemas pasivos se definen como los sistemas asociados a la envolvente del edificio que contribuyen a hacer uso del potencial contenido en el ambiente circundante, como puede ser el Sol o el viento.

Por otra parte, los sistemas activos son aquellos que consisten en uno o varios componentes mecánicos y eléctricos (ventiladores, bombas...) que trabajan mediante el uso de combustibles fósiles. La mayoría de los sistemas activos actuales se ha diseñado bajo la presunción de un abundante uso de combustibles fósiles, de manera que no necesariamente están en armonía con los sistemas pasivos<sup>[2]</sup>. Por lo tanto, se necesitan nuevos tipos de sistemas activos que puedan trabajar en armonía con los sistemas pasivos más avanzados, de manera que la demanda energética se satisfaga con la mayor eficiencia, minimizando el consumo de recursos.

Uno de esos nuevos tipos de sistemas activos que se deben ajustar a espacios primeramente acondicionados con sistemas pasivos es la calefacción a baja temperatura, que aproveche la baja demanda en términos exergéticos ligada a dicha aplicación. Minimizar la diferencia de temperatura entre el sistema y el espacio acondicionado permite ahorrar energía de gran calidad (exergía). Estamos, por lo tanto, yendo un paso más allá y hablando ya en términos de exergía, no de energía.

Los sistemas LowEx, por lo tanto, se definen como sistemas de calefacción y refrigeración que permiten el uso de energías de poca calidad como fuentes de energía. En la práctica, esto significa sistemas que provean energía a una temperatura cercana a la temperatura del espacio interior<sup>[4]</sup>.

El Libro Guía “Annex 37” contiene una base de datos donde se describen las diferentes tecnologías de este tipo, así como el estado de desarrollo actual de cada una<sup>[2]</sup>. Los sistemas LowEx se muestran clasificados en cinco tipos: calefacción y refrigeración superficial, calefacción y refrigeración de aire, generación de frío o calor, almacenamiento térmico y distribución.

Dentro de dicho documento se presentan casos de edificios LowEx actuales, algunos de los cuales se presentan a continuación:

- Hotel de Croy (París, Francia)

Se trata de un edificio de oficinas y salas de conferencia de tres plantas. La generación de calor se realiza mediante District Heating, mientras que para la refrigeración posee una bomba de calor. Para ambos casos, el sistema de distribución está formado por tuberías de pequeño diámetro (2 mm) distribuidas tras una capa de plástico en el techo, que proporcionan una potencia de alrededor de 80 W/m<sup>2</sup>.

El confort térmico logrado de esta manera es muy alto, lográndose un gradiente vertical de temperatura máximo de 1°C en invierno, entre los 10 cm y los 3.90 m de altura. Además, los ocupantes valoran la ausencia de ruido y movimiento de aire, lo que es meritorio en un edificio tan antiguo (las fachadas son del siglo XVIII).



Ilustración 6: fachada del Hotel de Croy <sup>[2]</sup>

A pesar de que no requiere de prácticamente de mantenimiento, la mayor desventaja es el coste de técnica utilizada. Se espera que dicho coste disminuya a medida que se implemente un mayor número de instalaciones de este tipo.

- Lienaertstraat Geleen (Países Bajos)

Se trata de un proyecto de remodelación de un edificio residencial de 48 apartamentos, con el objetivo de incrementar la eficiencia energética, reducir el consumo y mejorar el confort.

Dicha remodelación consistió, por un lado, en mejorar la envolvente térmica del edificio. Por otro lado, se instalaron nuevos sistemas de calefacción.

El suministro de calefacción se realiza mediante dos pequeños motores de cogeneración. Al mismo tiempo, la electricidad que ambos generan se utiliza para alimentar dos bombas de calor. Estas bombas de calor trabajan junto con los paneles solares del tejado para el suministro de ACS, y utilizan el aire exhausto del sistema de ventilación como fuente de calor.

Se tiene por tanto de un tanque de almacenamiento de 2500 litros para el calor a suministrar al agua caliente. Por último, tal y como puede comprobarse en el siguiente esquema, también se tienen dos calderas de condensación como apoyo para el suministro de calefacción.

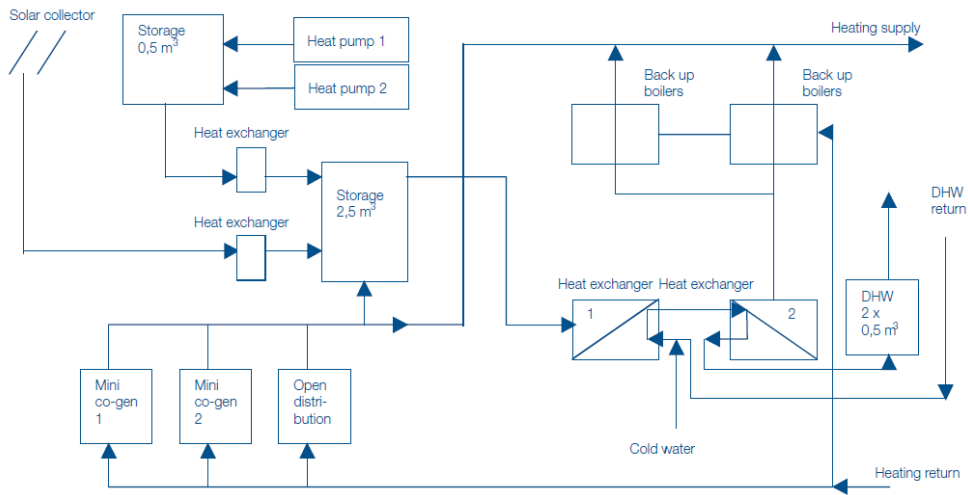


Ilustración 7: esquema de la instalación de Lienaarstraat Geleen [2]

A pesar de que los resultados de las medidas realizadas aún se están procesando, los ocupantes describen el confort térmico como “agradable”. Además, se consigue una reducción significativa de consumo de gas natural, reduciéndose los alrededor de 2100 m<sup>3</sup>/año antes de la reforma a unos 1000 m<sup>3</sup>/año.

- Viviendas ecológicas “Amboise” (Maastricht, Países Bajos)

Se trata de un proyecto de demostración de 18 viviendas adosadas, 9 de ellas orientadas al sur y otras 9 al norte, todas ellas con el mismo plano de planta con el fin de poder compararlas.

Las viviendas orientadas al sur contienen una caldera de gas de condensación para calefacción de espacios, así como para ACS. También poseen colectores solares para precalentar dicho agua caliente. La calefacción se realiza por las paredes (55/40°C), mientras que el cuarto de baño y la cocina poseen calefacción adicional por el suelo.

Las viviendas orientadas al norte también poseen calderas de gas de condensación para calefacción de espacios, pero no tienen colectores solares. Los equipos de calefacción son radiadores en este caso (70/50°C). Para ACS se utiliza una bomba de calor, que extrae energía del aire del sistema de ventilación. Esta bomba de calor se combina con un tanque de almacenamiento.



Ilustración 8: viviendas adosadas ecológicas “Amboise” [2]

Como resultado, el calor suministrado para la calefacción de ambas viviendas es muy similar, así como las temperaturas interiores medidas. La velocidad del aire es también pequeña en ambos casos.

Sin embargo, en cuanto al confort térmico el gradiente vertical de temperatura medido es de 2°C en las viviendas con calefacción por la pared, mientras que asciende a 3°C para el caso de los radiadores. En este último, se observa una disminución de temperatura interior de 4°C durante la noche, la cual se recupera en una hora a la mañana.

En el caso de la calefacción por la pared, la vivienda se enfría muy lentamente durante la noche, y también se calienta lentamente por la mañana. Esto hace que la temperatura no varíe más de 1°C respecto a la temperatura media del día.

De los casos presentados pueden intuirse algunas de las oportunidades que ofrecen los sistemas LowEx. Considerando que el número de nuevas viviendas representa un porcentaje muy pequeño del parque residencial actual, la posibilidad de instalar sistemas LowEx en proyectos de renovación de viviendas ya existentes ofrece un amplio campo de aplicaciones. Campo de aplicaciones en el que entrarían todo tipo de edificios, no sólo viviendas.

Además, pueden ayudar en otros aspectos como los acústicos, y ofrecen una amplia flexibilidad en cuanto a combustibles, lo que puede proteger frente a variaciones en el precio de estos últimos. Algunos de los otros beneficios del uso de sistemas de baja exergía son los siguientes <sup>[4]</sup>:

- Evita que las grandes diferencias entre la temperatura del aire interior y la del sistema provoquen una temperatura interior no homogénea en el espacio. Esto deriva en un alto confort térmico, mayor que en los edificios pasivos.
- Evitan las condensaciones que sistemas de refrigeración de baja temperatura pueden provocar.
- Rebajar los requerimientos de resistencia a altas temperaturas que los equipos y conductos deben satisfacer.
- Flexibilidad en la elección del combustible o la fuente de energía. Esto provoca que el usuario pueda beneficiarse de las ventajas económicas que un tipo de combustible pueda ofrecer.
- Alta eficiencia energética de los sistemas.

Sin embargo, también pueden numerarse una serie de desventajas relacionadas con la implementación de este tipo de sistemas <sup>[4]</sup>:

- Mayores costes iniciales de inversión. A pesar de ello, los costes del ciclo de vida son similares a los de los sistemas tradicionales.
- Construcción más compleja.
- No se obtienen eficiencias energéticas mayores que con los edificios pasivos.



## 7. Análisis de alternativas

El edificio estudiado presenta características propias que lo alejan de ser un edificio común. Por un lado, se encuentra en una zona de desnivel importante, y se adapta a la colina posterior contra la que se apoya. Además, la planta baja se retranquea respecto a la primera planta, y las vidrieras de la segunda planta forman una especie de patio interior.

Todo ello provoca la existencia de multitud de factores de sombreado a considerar. Además, se trata de un edificio con gran proporción de ventana, cuya fachada principal está orientada al sureste.

Puede preverse, por lo tanto, que en el presente edificio la influencia de las sombras será mayor que lo que representa generalmente, ya que en multitud de edificios puede incluso obviarse dicho sombreado.

Por ello, se decide analizar la influencia que tiene el sombreado en la demanda de calefacción, de manera que se introduce un modelo del edificio en software en el que no se considerará ninguna sombra excepto la proyectada por las lamas metálicas que forman las fachadas principales. Los resultados indicarán la sensibilidad de la demanda de calefacción a dichas sombras, de manera que podría tenerse una noción de lo que ocurriría con posibles sombreados futuros.

Por otro lado, otra peculiaridad del edificio analizado es que, debido a que se ha construido recientemente, los valores de transmitancia térmica que muestran sus cerramientos son muy pequeños. Se trata de un edificio de cerramientos muy pesados y muy buenos aislantes.

Por ello, se intuye que los puentes térmicos tendrán una influencia mayor de la que normalmente tienen. En muchos casos, debido a la dificultad de conocer valores de transmitancia lineal, incluso se obvian.

En este edificio, sin embargo, pueden tener una influencia notablemente superior, debido a las buenas propiedades térmicas de los cerramientos y a la gran cantidad de puentes térmicos existentes. Se analizará también, por lo tanto, la influencia que tienen los puentes térmicos en el presente edificio. Para ello se introducirá un tercer modelo en software.

Por último, se definirá un cuarto modelo aunando las modificaciones realizadas en estos dos últimos, de manera que no se introducen en él ni los sombreados ni los puentes térmicos. De este modo, se analizará la influencia conjunta de ambos factores en la demanda anual de calefacción.

## 8. Análisis de riesgos

En este punto se pretende exponer la magnitud de los potenciales errores a cometer al realizar las simplificaciones que se considerarán en la definición del edificio en el software de simulación. Se trata de presentar los factores que pueden afectar al rigor de los resultados de la simulación dinámica de la demanda de calefacción del edificio, que son los que posteriormente se utilizan para el análisis termoeconómico, y justificar las consideraciones realizadas.

En cuanto a la geometría y envolvente del edificio, existen tres fachadas en la planta baja y la primera planta que se dividen en una fracción enterrada bajo el terreno y una fachada en contacto con el aire exterior. Se ha considerado que las fracciones enterradas tendrán una composición concreta, definiendo las partes en contacto con el aire exterior con otro tipo de cerramiento. Es probable, sin embargo, que en realidad en estos casos toda la fachada esté compuesta del mismo cerramiento.

En el presente trabajo se diferencian por tanto dos cerramientos distintos en estas fachadas. La diferencia entre definir uno u otro, no obstante, no será significativa porque el área enterrada de dichas fachadas es pequeña. No influirá prácticamente en la demanda de calefacción.

Debe añadirse que el único cerramiento en voladizo definido corresponde a la fachada principal orientada al sureste, como posteriormente se mostrará. Existe también un ligero saliente en la fachada noreste, que al no ser tan significativo como el anterior y al no tener más que una pequeña ventana debajo de él (en cuyo factor de sombra podría influir levemente), se decide no considerar.

Por otro lado, a la hora de introducir las sombras del edificio se presenta la complejidad de simular el factor de sombra provocado por el estor de cada consulta en su fracción de ventana. Cada consulta posee el suyo propio, que se modula manualmente, por lo que el factor de sombra provocado por cada uno de ellos dependerá de la decisión y costumbre de cada profesional. Existirán también periodos de tiempo en el que algunas consultas estarán cerradas, que pueden provocar ganancias solares excesivas en verano en caso de mantenerse el estor recogido en su parte superior.

Se decide simular los factores de sombra de los estores como uno solo, y además se define un calendario de verano en el que se hará uso de ellos, explicado más adelante. La influencia de ello será pequeña a la hora de calcular la demanda de calefacción, ya que sería la refrigeración la que se vería más afectada y esta última no se considera en el presente trabajo.

Tampoco se ha considerado el factor de sombra que pueden provocar los árboles recientemente replantados en el parque situado frente a la fachada principal de accesos, debido a que se encuentran relativamente lejos y en el tiempo en el que se ha analizado el edificio no se observan aun como un obstáculo importante. Es probable, no obstante, que en horas en las que el sol se encuentre a baja altura puedan tener su influencia.

En referencia a los puentes térmicos, posteriormente se expone que existen puentes térmicos de transmitancia lineal negativa que no se definen en el modelo. Su influencia, al no ser los valores de dichas transmitancias grandes y tratarse únicamente de dos tipos de puente térmico, no se prevé importante. Sin embargo, podrán sacarse conclusiones respecto a la

influencia de los puentes térmicos en general más adelante, a partir de los resultados que se obtengan.

Para terminar con la geometría y envolvente, debe señalarse que en realidad el aire de las diferentes zonas térmicas definidas a continuación se acopla en las zonas de escalera. Existe, por lo tanto, una mezcla de aire que puede contribuir a una mayor homogeneización de las temperaturas de cada zona. Sin embargo, considerando el gran volumen de cada una de ellas, dicho acoplamiento no se considera importante y no se define.

Respecto a las consideraciones referidas al escenario de calefacción, se ha definido una temperatura de consigna general. La memoria de construcción del proyecto afirma que “cada despacho o consulta tiene la facultad de adecuar el encendido y apagado de la calefacción a sus necesidades”. Debido a que el número de consultas es muy alto y sería excesivamente laborioso definir una zona térmica por cada una de ellas, se decide considerar que en todas las consultas la calefacción funcionará de igual manera. Además, es prácticamente imposible definir un escenario de calefacción concreto que se adecua a las costumbres de cada profesional que trabaje en una consulta.

El valor de la infiltración también se ha considerado igual para todo el edificio. Como se menciona posteriormente, a falta de más información se siguen las indicaciones de publicaciones oficiales del IDAE. Los resultados mostrarán que en este edificio la infiltración no es un factor que influya significativamente en su demanda de calefacción.

La consideración con la que probablemente la simulación se aleja más de la realidad es la referida al consumo de ACS. Como se expondrá más adelante, a falta de datos referidos a dicho consumo, es necesario estimar un perfil horario, que tratará de justificarse pero que necesariamente se alejará ligeramente de la realidad.

Tampoco es posible conocer la evolución de la ocupación horaria con exactitud, por lo que se requerirá acudir a documentos normativos y seguir sus indicaciones.

En resumen, se comprueba la necesidad de realizar ciertas simplificaciones. Se trata de un edificio geoméricamente complejo, con diversos tipos de fachadas y formas. Además, siendo un edificio del sector terciario, sus perfiles de ocupación y costumbres son difíciles de definir. Sin embargo, las justificaciones expuestas en el presente punto, así como la extensa exposición de la metodología seguida que comienza a continuación, demuestran que finalmente el edificio se define en el software con gran rigurosidad.

## 9. Metodología

### 9.1. Programa de simulación

Para la simulación transitoria de un sistema energético (en este caso un edificio) y su evaluación térmica existen numerosos programas informáticos. Debido a la gran cantidad de datos e información que necesitan que se les suministre, todos ellos presentan un manejo notablemente laborioso. Están el EnergyPlus, SUNCODE, S3PAS, TRNSYS...

En el presente trabajo se ha optado por utilizar el software TRNSYS, con su versión 17. Las razones se exponen a continuación:

- Permite una muy buena conexión con otros programas como Excel, que se utilizará para la realización de los cálculos correspondientes a la aplicación de la Termoeconomía, a partir de los resultados obtenidos en TRNSYS.
- Facilita la integración de las características del edificio analizado y sus instalaciones, incluyendo la estrategia de control de estas últimas.
- Muestra una gran flexibilidad para adaptar los valores por defecto a las necesidades concretas de la instalación a simular.

Se trata de un software cuya primera versión se desarrolló en 1975 para el estudio de sistemas con energía solar. Durante más de 35 años de disponibilidad comercial, el software se ha ido desarrollando a través de distintos centros de investigación de EEUU, Alemania, Francia u otros países.

El software se compone de un motor, denominado "TRNExe", que lee y procesa un archivo de entrada. De manera iterativa, resuelve el sistema, determina la convergencia y visualiza las variables. Dicho archivo de entrada se crea mediante el módulo "Simulation Studio", utilizando para ello diversos componentes, denominados "types".

TRNSYS contiene en sus librerías una amplia biblioteca de dichos componentes que modelan los sistemas energéticos más comunes. La biblioteca estándar incluye aproximadamente 150 modelos, que van desde modelos de bombas o calderas hasta modelos de edificios multizona.

Para la definición de las características de estos últimos edificios TRNSYS posee el módulo "TRNBuild", donde se introducen todos los datos referidos a la orientación, zonas térmicas, envolvente, diversos escenarios...

También existen librerías no estándar disponibles de componentes de libre acceso, componentes que comercializan los distribuidores de TRNSYS, etc. Los componentes se construyen de tal manera que el usuario puede modificar los componentes existentes o incluso definir un componente nuevo que modele un sistema concreto. Para ello, el software es de código abierto y dispone de un método para añadir nuevos módulos basados en el código fuente Fortran.

A nivel normativo de la aplicación en edificios, TRNSYS es conforme a la ASHRAE 140 y se puede usar para el cumplimiento de ASHRAE 90.1. También es conforme a la directiva europea de eficiencia energética en edificios.

Mediante este software se realizará la simulación cuasi-estacionaria del edificio a lo largo de un año, considerando intervalos de tiempo de una hora.

## 9.2. Descripción del edificio

El edificio objeto del análisis es el Centro de Salud Buenavista de Potugalete (Bizkaia). Se sitúa en una parcela rectangular de 40.7 m de largo por 29.36 m de fondo, con una orientación principal Noroeste – Sureste.



Ilustración 9: vista de las fachadas acristaladas y las lamas metálicas del edificio.

Sus fachadas principales están orientadas en dirección Sureste, hacia la Avenida Campazar, y Noreste, hacia un parque. La siguiente imagen muestra ambas fachadas, las cuales son totalmente acristaladas en la primera y segunda planta. La linde Noreste queda definida también por el parque, mientras que la Suroeste la limita una escalera.



Ilustración 10: vista desde la Avenida Campazar de los accesos del edificio.

La zona donde se ubica tiene un desnivel pronunciado que se refleja tanto en el lado longitudinal y como en el lado transversal de la parcela, siendo este último más pronunciado, como puede observarse en la siguiente figura.



Ilustración 11: desniveles en los lados longitudinal (izq) y transversal (dcha) de la parcela.

El edificio está formado por un sótano, una planta baja, la primera planta y la segunda planta, siendo variable la superficie de cada una, tal y como puede comprobarse en los planos acotados del Anexo I.

Debido a la complejidad del edificio, con cerramientos en contacto con el terreno, desniveles, diferente superficie en cada planta, fachadas en voladizo, diversos tipos de sombras, etc., se

considera necesario exponer con detalle las consideraciones realizadas en la definición del edificio, a fin de que puedan tenerse en consideración a la hora de valorar los resultados.

### 9.2.1. Zonas térmicas

La totalidad del edificio analizado está calefactada, excepto una zona perteneciente al sótano y formada por las estancias que contienen la instalación de generación de calor (con las calderas, depósito de inercia, acumulador de ACS...), el sistema de ventilación y el rack (soporte metálico que aloja equipamiento electrónico, informático y de comunicaciones).

Por lo tanto, se examina la posibilidad de diferenciar dos zonas térmicas, una no calefactada que contendría la zona presentada previamente, y otra zona calefactada definida por el resto de la superficie del sótano y las plantas restantes.

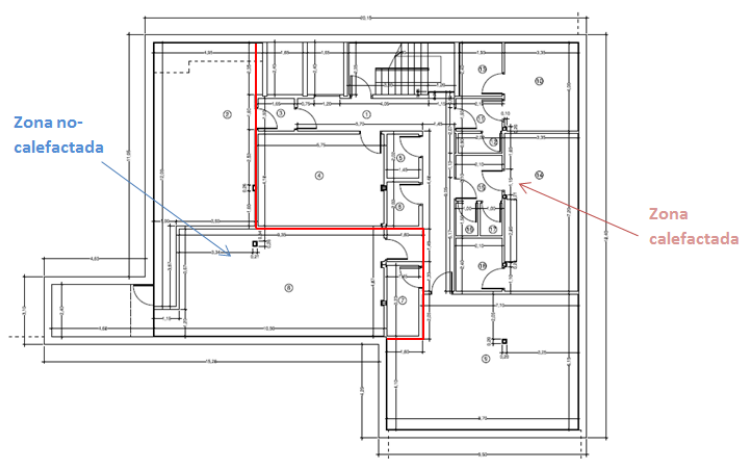


Ilustración 12: vista en planta de las dos zonas térmicas definidas para el sótano.

Sin embargo, con el fin de poder diferenciar las temperaturas que se obtienen en las diferentes plantas, se decide finalmente definir una zona calefactada por planta, de manera que se tendrían cinco zonas térmicas: la zona no calefactada del sótano conteniendo las diferentes instalaciones descritas anteriormente, el resto del sótano, planta baja, primera planta y segunda planta. Siendo las cuatro últimas zonas calefactadas mediante suelo radiante.

### 9.2.2. Envoltente

#### 9.2.2.1. Transmitancia térmica de los cerramientos

La siguiente tabla contiene, en forma resumida, los diferentes cerramientos definidos en TRNBuild para el edificio objeto de estudio, así como sus transmitancias térmicas. En el Anexo II pueden consultarse las diferentes capas que forman cada cerramiento, así como su espesor.

Tabla 2: transmitancia térmica de los cerramientos definidos en TRNSYS.

Cerramiento	U (W/m2K)
Zócalo exterior	0.49
Fachadas traseras	0.47
Zona curva	0.58
Muro bajo rasante	0.83
Cubierta principal	0.37
Cubierta secundaria	0.53
Solera	0.61
Forjado	0.77

Los cuatro primeros cerramientos corresponden a paredes exteriores verticales, bien en contacto con el aire exterior o bien en contacto con el terreno, como en el caso del “Muro bajo rasante”. Se comprueba que dicho cerramiento muestra el valor de transmitancia térmica mayor. Sin embargo, al no ser la temperatura del terreno con el que este cerramiento estará en contacto tan extrema como la del aire ambiente, manteniéndose acotada entre valores de más templados, las pérdidas de calor por dicho cerramiento no serán tan importantes como a priori pudiese pensarse.

Los dos siguientes cerramientos de la tabla 3 son tipos de cubierta. La cubierta principal es la que cubre la mayor parte del edificio y muestra una ligera inclinación, que se obvia en la definición del edificio, considerándose plana. La cubierta secundaria es la cubierta lisa que soporta los paneles fotovoltaicos instalados en ella, y corresponde únicamente a la zona del núcleo de servicios.

En realidad, existe un tercer tipo de cubierta correspondiente a la sala de reuniones de la primera planta. Esta cubierta está ajardinada, por lo que además de las capas de material que corresponden al cerramiento “Cubierta principal”, se añade una última capa de terreno vegetal con los datos de densidad, calor específico y conductividad térmica proporcionados por la librería del software CE3x, promovido por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

Sin embargo, se observa que a efectos de transmitancia térmica esta incorporación no tiene prácticamente ninguna influencia. Si que tendrá, sin embargo, un valor de absorptividad solar diferente. A pesar de ello, debe admitirse que este tipo de capa última de vegetación influye fundamentalmente a la hora de reducir la demanda anual de refrigeración de un edificio. Refrigeración que no será objeto de estudio en el presente trabajo.

El siguiente cerramiento en la tabla 3 es el correspondiente a la solera y, finalmente, los dos últimos son las particiones interiores del edificio que limitarán las diferentes zonas térmicas. El forjado separa las distintas plantas del edificio, mientras que el tabique pladur divide el sótano entre la zona calefactada y la no-calefactada.

#### 9.2.2.2. Absortividad

La absorptividad es la fracción de la radiación solar incidente a una superficie que es absorbida por la misma. Se trata por tanto de una característica de cada superficie.

Todos los cerramientos presentados previamente se han definido con un coeficiente de absorptividad solar de la superficie interior de 0.25, correspondiente a una superficie lisa blanca<sup>[19]</sup>. La absorptividad solar de la superficie exterior considerada, para cada cerramiento en contacto con el aire exterior, se resume en la siguiente tabla.

Tabla 3: absorptividad solar de la superficie exterior de cada cerramiento definido.

Cerramiento	$\alpha$ [-]
Zócalo exterior	0.75
Fachadas traseras	0.7
Zona curva	0.25
Cubierta principal	0.25
Cubierta secundaria	0.7

### 9.2.2.3. Coeficiente de convección

Además de la absorptividad correspondiente a cada una de las superficies de un cerramiento, es necesario también definir los coeficientes de transferencia de calor convectiva, sin parte radiante, de dichas superficies.

A pesar de que considerar unos coeficientes constantes (cuyos valores por defecto tiene incorporados TRNBuild) es suficiente en la mayoría de las aplicaciones, se comprueba que en la simulación a realizar el aumento del coste computacional es asumible al incorporar la realización, por parte del programa, de un cálculo interno en cada periodo de tiempo definido en la simulación.

En dicho cálculo se tiene en cuenta que el coeficiente de convección depende principalmente en la diferencia de temperaturas entre la superficie y el aire, así como en la dirección del flujo de calor. De esta manera, el programa calculará el coeficiente de convección de las superficies interiores de la siguiente forma:

$$\alpha_{conv} = const \cdot (T_{surf} - T_{air})^{exp} \quad (22)$$

Los valores de la constante y el exponencial usados en el cálculo dependen de si el cerramiento es una pared vertical, suelo o techo, y están definidos por defecto en el programa.

Para el caso de superficies exteriores, debe tenerse en cuenta la influencia de la velocidad del viento, para lo que existe la posibilidad de que el usuario introduzca una correlación adecuada al emplazamiento analizado. Sin embargo, en el presente trabajo no se disponen de datos en ese sentido, por lo que se decide definir el coeficiente de convección de las superficies exteriores como un valor constante de 64 kJ/hm<sup>2</sup>K.

### 9.2.2.4. Factor de visión

El denominado "View factor to the sky" se define como la fracción del cielo visto por un cerramiento respecto al hemisferio total, y se utiliza por parte del programa como factor de ponderación entre la temperatura ambiente y la temperatura del cielo.

En el presente análisis se definen, tal como recomienda TRNBuild, diferentes valores para cada tipo de cerramiento: 1 para superficies horizontales y 0.5 para superficies verticales.

La excepción será la superficie de la cubierta secundaria que queda oculta bajo los paneles solares, a la que se le da un factor de visión nulo. La misma consideración se realiza con la superficie inferior de la primera planta dispuesta en voladizo respecto a la planta baja del edificio.

### 9.2.2.5. Sótano no calefactado

Tiene una superficie de 130.83 m<sup>2</sup> y una altura de 3.5 m, por lo que su volumen es de 458 m<sup>3</sup>. Este último valor del volumen de aire correspondiente a la zona térmica analizada es utilizado por TRNBuild para el cálculo de la capacitancia térmica de dicha zona. En el cálculo de la capacitancia no se considerará ningún mobiliario en el presente trabajo.

Esta zona térmica se separa respecto a la zona calefactada mediante un tabique pladur de 107.8 m<sup>2</sup>. En total, los muros verticales que lo separan del terreno suman 171.26 m<sup>2</sup>. La ilustración 13 muestra la localización de dichos cerramientos en un plano acotado.



Tabla 4: cerramientos definidos para el sótano no calefactado.

Sótano no calefactado		
Tipo de cerramiento	Área (m <sup>2</sup> )	Descripción
Muro bajo rasante	171.26	Cerramiento vertical en contacto con el terreno
Solera	130.83	Cerramiento horizontal en contacto con el terreno
Forjado	130.83	Partición horizontal interior adyacente a planta baja
Tabique pladur	107.8	Partición vertical interior adyacente a sótano calefactado

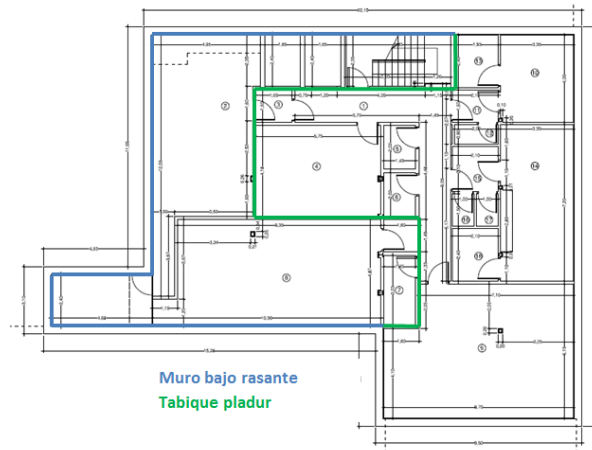


Ilustración 13: localización de cada cerramiento del sótano no calefactado en plano acotado.

#### 9.2.2.6. Sótano calefactado

Tiene una superficie de 175.54 m<sup>2</sup> y una altura de 3.5 m, por lo que su volumen es de 614 m<sup>3</sup>. Se separa respecto a la zona calefactada mediante un tabique pladur de 107.8 m<sup>2</sup>. En total, los muros que lo separan del terreno suman 135 m<sup>2</sup>. La ilustración 14 muestra la localización de estos dos últimos cerramientos en un plano acotado.

Tabla 5: cerramientos definidos para el sótano calefactado.

Sótano calefactado		
Tipo de cerramiento	Área (m <sup>2</sup> )	Descripción
Muro bajo rasante	135.0	Cerramiento vertical en contacto con el terreno
Solera	175.54	Cerramiento horizontal en contacto con el terreno
Forjado	175.54	Partición horizontal interior adyacente a planta baja
Tabique pladur	107.8	Partición vertical interior adyacente a sótano no calefactado

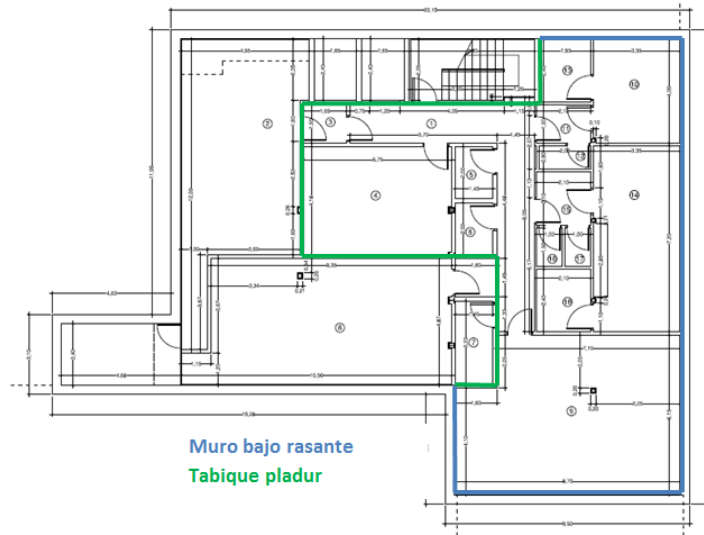


Ilustración 14: localización de cada cerramiento del sótano calefactado en plano acotado.

### 9.2.2.7. Planta baja

Antes de presentar los cerramientos y particiones interiores definidas en esta zona térmica, es necesario aclarar la forma de esta última. La siguiente imagen muestra cómo no se trata de una zona térmica definida por una planta corriente de altura constante, sino que en su vestíbulo central la altura que alcanza es mayor. Este vestíbulo central no queda limitado por superiormente por un forjado adyacente a la primera planta, como en el resto de la planta baja, sino que se introduce en aquella hasta quedar limitado superiormente por una cubierta acristalada horizontal que da al exterior.



Ilustración 15: vestíbulo central de la planta baja.

En la definición del edificio en TRNBuild, se considera que tiene una superficie total de 736.36 m<sup>2</sup>, con una altura general de 4.15 m, que aumenta en el vestíbulo central hasta los 7.65 m. De esta manera, el volumen total de aire de la zona térmica es de 3056 m<sup>3</sup>.

Esa superficie total mencionada es la que se asigna, previa substracción de los 62.3 m<sup>2</sup> del vestíbulo central, como área al forjado adyacente a la primera planta. Esos 62.3 m<sup>2</sup> de la cubierta acristalada que puede observarse en la imagen previa se definen como cerramiento con un 100% de ventana.

Por la parte inferior, a esa superficie total se le restan los 306.37 m<sup>2</sup> que tiene adyacentes al sótano mediante forjado (130.83 m<sup>2</sup> a la parte no calefactada y 175.54 m<sup>2</sup> a la parte

calefactada), para obtener los 430 m<sup>2</sup> de superficie adicional respecto a aquel que tiene en contacto con el terreno, superficie definida como solera. El área en planta que ocupa la planta baja es considerablemente superior al área ocupada por el sótano.

La fachada principal se considera formada por 126 m<sup>2</sup> de cerramiento “Zócalo exterior” orientado al sureste. En esa orientación también existen 37.35 m<sup>2</sup> de muro enterrado en contacto con el terreno. Este último valor se obtiene de la proyección frontal de la ilustración 9.2.2.7.2., en la que se mide que el 22.8% de la orientación sureste está enterrada. Adicionalmente, en la zona de acceso al edificio se obtienen 16.6 m<sup>2</sup> de zócalo orientados al suroeste y 22.5 m<sup>2</sup> orientados al noreste.

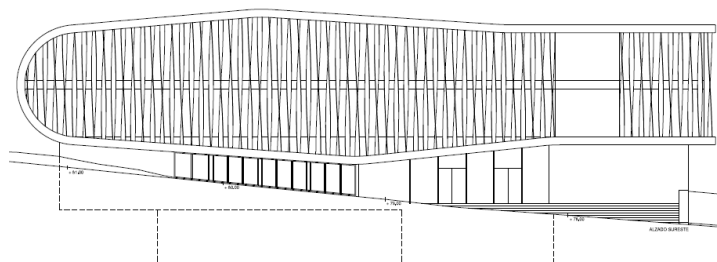


Ilustración 16: proyección frontal de la fachada principal del edificio.

En la fachada noreste se obtiene, también de su proyección alzada, que el 80% de la fachada está enterrada. Esta fracción se introduce en TRNBuild como “Muro bajo rasante”, con una superficie de 87.36 m<sup>2</sup>. El resto de la fachada, de 21.84 m<sup>2</sup>, se define como “Zócalo exterior” orientado al noreste.

El resto de la envolvente de la planta baja correspondiente a la parte trasera del edificio está enterrada, en contacto con el terreno. Por último, las cuatro superficies acristaladas verticales adyacentes a la primera planta, en la parte superior del vestíbulo central, se definen como ventana 100% y ocupan un área total de 111.3 m<sup>2</sup>.

Tabla 6: cerramientos definidos para la planta baja.

Planta baja		
Tipo de cerramiento	Área (m <sup>2</sup> )	Descripción
Muro bajo rasante	37.35	Fracción de la fachada sureste en contacto con el terreno
Muro bajo rasante	87.36	Fracción de la fachada noreste en contacto con el terreno
Muro bajo rasante	278.88	Envolvente enterrada en la parte trasera del edificio
Solera	430.0	Cerramiento horizontal en contacto con el terreno
Forjado	130.83	Partición horizontal interior adyacente a sótano no calefactado
Forjado	175.54	Partición horizontal interior adyacente a sótano calefactado
Forjado	674.06	Partición horizontal interior adyacente a primera planta
Cubierta acristalada	62.3	Cubierta acristalada horizontal del vestíbulo central
Zócalo exterior	126.0	Fachada principal orientada al sureste
Zócalo exterior	16.60	Fachada en la zona de accesos, orientación suroeste
Zócalo exterior	22.5	Fachada en la zona de accesos, orientación noreste
Zócalo exterior	21.84	Fracción de la fachada noreste que no está en contacto con el terreno
Ventanas interiores	111.3	Superficie total de la cristalera vertical interior adyacente a la primera planta

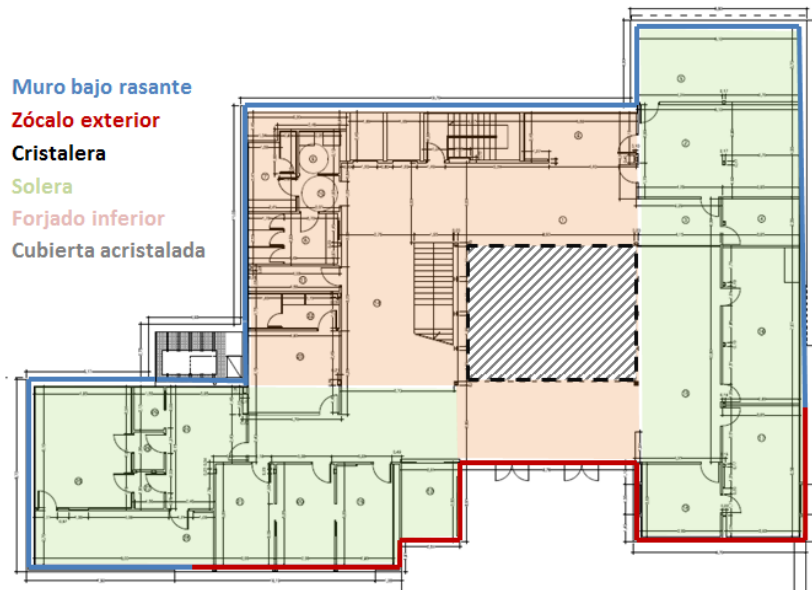


Ilustración 17: localización de cada cerramiento de la planta baja en plano acotado.

De los 824.12 m<sup>2</sup> de superficie (para un volumen de 2884 m<sup>3</sup>), 674.06 m<sup>2</sup> corresponden al forjado adyacente a la planta baja. El resto de su suelo, 150.06 m<sup>2</sup>, corresponden a la superficie horizontal saliente (en voladizo) respecto a la planta baja, que se define como cerramiento “Zona curva”.

Las otras cuatro cristaleras verticales adyacentes a la zona térmica de la planta baja forman una superficie total de 111.3 m<sup>2</sup>, tal y como se ha mencionado en el punto previo.

Respecto a su contorno superior, de los 824.12 m<sup>2</sup> de superficie, sólo 784.12 m<sup>2</sup> corresponden al forjado adyacente a la segunda planta, ya que los 40 m<sup>2</sup> restantes corresponden a la cubierta ajardinada de la sala de reuniones, definida previamente con el nombre “Cubierta tercera”.

Las fachadas principales se definen como fachadas acristaladas siendo el 100% de sus superficies ventanas. Estas ventanas tienen, debido a las lamas metálicas exteriores situadas frente a ellas, un factor de sombra constante. Son 149.42 m<sup>2</sup> de fachada en dirección sureste y 73.21 m<sup>2</sup> en dirección noreste. En esta última dirección se tiene un 28% de la fachada enterrada, con un cerramiento definido como “Muro bajo rasante”.

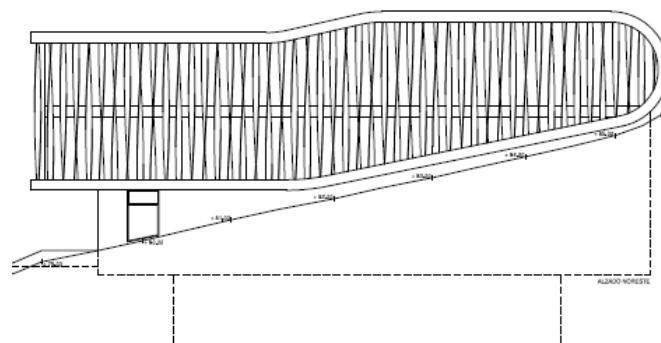


Ilustración 18: plano alzado de la fachada noreste semienterrada.

La zona curva en dirección suroeste tiene una superficie de 40.95 m<sup>2</sup>. La superficie que correspondería a la otra zona curva, orientada al noroeste, queda enterrada bajo el terreno, por lo que en esa última orientación el único cerramiento exterior que se definirá como “Zona curva” será el de la segunda planta. En esta zona térmica de la primera planta, dicha fachada se define como “Muro bajo rasante”. Este muro, junto con el resto de la envolvente trasera del edificio enterrada y en contacto con el terreno, suma 137.91 m<sup>2</sup> de superficie.

Las dos fachadas restantes se definen mediante el cerramiento “Fachadas traseras”: 112.67 m<sup>2</sup> dirección noroeste y 64.23 m<sup>2</sup> dirección suroeste.

Tabla 7: cerramientos definidos en la primera planta.

Primera planta		
Tipo de cerramiento	Área (m <sup>2</sup> )	Descripción
Forjado	674.06	Partición horizontal interior adyacente a planta baja
Ventanas interiores	111.3	Superficie total de la cristalera vertical interior adyacente a la planta baja
Forjado	784.12	Partición horizontal interior adyacente a segunda planta
Cubierta tercera	40.0	Cubierta ajardinada de la sala de reuniones
Zona curva	150.06	Cerramiento horizontal inferior de la zona térmica, en voladizo respecto a la planta baja
Zona curva	40.95	Fachada de orientación suroeste
Fachadas traseras	43.72	Fachada trasera de orientación noroeste
Fachadas traseras	32.9	Fachada trasera de orientación suroeste
Fachada acristalada	149.42	Fachada principal de orientación sureste
Fachada acristalada	73.21	Fachada principal de orientación noreste
Muro bajo rasante	28.47	Fracción de la fachada noreste en contacto con el terreno
Muro bajo rasante	137.91	Envolvente enterrada en la parte trasera del edificio

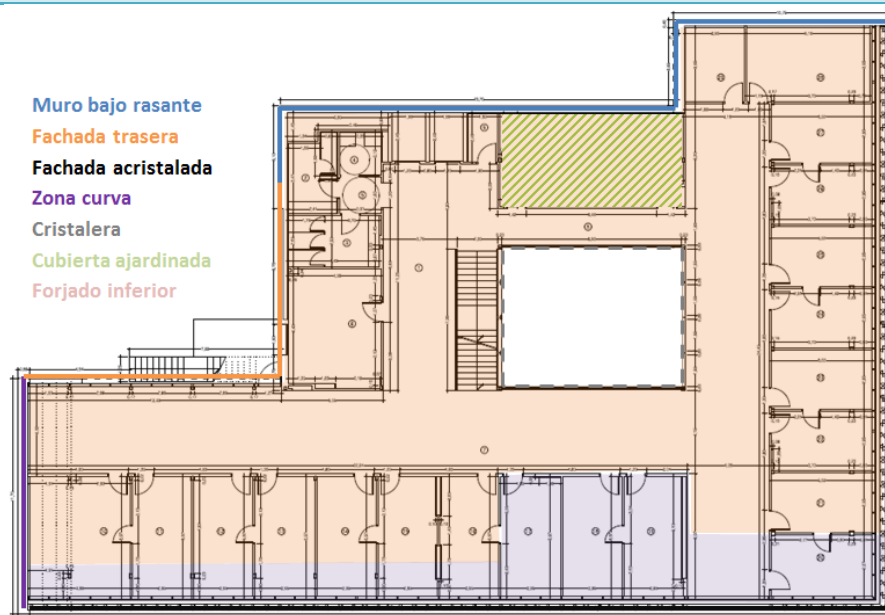


Ilustración 19: localización de cada cerramiento de la primera planta en plano acotado.

### 9.2.2.8. Segunda planta

De los 784.12 m<sup>2</sup> de área del forjado adyacente a la primera planta, 634.81 m<sup>2</sup> corresponden a la cubierta principal, mientras que los restantes 149.31 m<sup>2</sup> corresponden a la cubierta secundaria, ubicada en el núcleo de servicios. De estos últimos, 56 m<sup>2</sup> no tienen ningún panel encima, mientras que los restantes 93.31 m<sup>2</sup> soportan paneles fotovoltaicos. Su volumen total es de 2744 m<sup>3</sup>.

Al igual que en la primera planta, sus dos fachadas principales son acristaladas, a las que se les asigna posteriormente un factor de sombra constante debido a las lamas metálicas. La superficie total es de 149.42 m<sup>2</sup> en dirección sureste y 102.38 m<sup>2</sup> orientados al noreste. En este último caso, y a diferencia de la primera planta, se tiene toda la fachada en contacto con el aire exterior, por encima de la rasante.

Esta zona térmica contiene dos cerramientos definidos como “Zona curva”: 37.63 m<sup>2</sup> en dirección noroeste y 40.95 m<sup>2</sup> orientados al suroeste. En la parte trasera del edificio también se definen otros tres cerramientos del tipo “Fachadas traseras”: 81.2 m<sup>2</sup> orientados hacia el suroeste, 112.67 al noroeste y 17.68 m<sup>2</sup> al noreste.

Por último, se definen las cristaleras que muestra la siguiente imagen. Estas cristaleras están orientadas hacia los espacios exteriores donde a la altura de este segundo piso no hay ninguna zona interior, debido a que la altura del edificio en esos espacios llega hasta la primera planta. Se trata de los espacios limitados superiormente por la cubierta ajardinada correspondiente a la primera planta y a la cubierta acristalada del vestíbulo central correspondiente a la zona térmica de la planta baja.



Ilustración 20: cristaleras de la segunda planta.

En total, se tienen 31.15 m<sup>2</sup> para las cristaleras orientadas al noroeste y sureste, y otros 24.5 m<sup>2</sup> para aquellas orientadas al noreste y suroeste.

Tabla 8: cerramientos definidos en la segunda planta.

Segunda planta		
Tipo de cerramiento	Área (m <sup>2</sup> )	Descripción
Forjado	784.12	Partición horizontal interior adyacente a primera planta
Cubierta principal	634.81	Cubierta principal ligeramente inclinada que junto con las zonas curvas envuelve el edificio
Cubierta secundaria	56.0	Fracción de la cubierta plana que no queda oculta bajo los paneles solares

<b>Cubierta secundaria</b>	93.31	Fracción de la cubierta plana oculta bajo los paneles solares
<b>Zona curva</b>	40.95	Fachada orientación suroeste
<b>Zona curva</b>	37.63	Fachada orientación noroeste
<b>Fachada acristalada</b>	102.38	Fachada principal orientada al noreste
<b>Fachada acristalada</b>	149.42	Fachada principal orientada al sureste
<b>Fachadas traseras</b>	81.2	Fachada orientación suroeste
<b>Fachadas traseras</b>	112.67	Fachada orientación noroeste
<b>Fachadas traseras</b>	17.68	Fachada orientación noreste
<b>Cristalera</b>	24.5	Cristalera orientada al noreste
<b>Cristalera</b>	24.5	Cristalera orientada al suroeste
<b>Cristalera</b>	31.15	Cristalera orientada al noroeste
<b>Cristalera</b>	31.15	Cristalera orientada al sureste

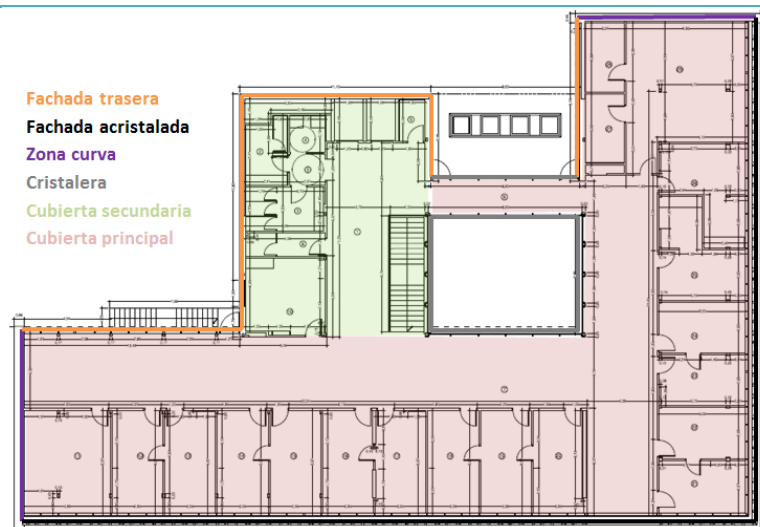


Ilustración 21: localización de cada cerramiento de la segunda planta en plano acotado.

### 9.2.2.9. Ventanas

En el presente trabajo solo se ha considerado un único tipo de ventana, y es la definida en la memoria del proyecto de construcción del edificio. Este tipo de ventana se define con las características que recoge la siguiente tabla, de manera que las diferencias entre las diversas ventanas del edificio se reducirán al área de cada una y al factor de sombra que le corresponda.

Tabla 9: características térmicas de la ventana tipo definida en TRNSYS.

Ventana tipo	
<b>Vidrio</b>	U (W/m <sup>2</sup> K): 1.6
	Factor solar: 0.7
<b>Marco</b>	U (W/m <sup>2</sup> K): 4
	% Hueco 8%

Por un lado, la siguiente tabla resume las superficies y orientación de todas las ventanas del edificio estudiado. En el anexo III puede observarse la localización en plano acotado de cada una de ellas, así como la numeración utilizada para definir sombreados.

Tabla 10: área y orientación de las ventanas del edificio.

	Área (m <sup>2</sup> )	Orientación
<b>Planta baja</b>	17.6	SE
	36.35	SE

	2.25	SO
	22.4	NE
	2.4	NE
	62.1	Horizontal
<b>Primera planta</b>	43.6	NO
	14.18	SE
	135.1	SE
	73.1	NE
<b>Segunda planta</b>	102	NE
	14.18	SE
	135.1	SE
	1.44	SO
	31.15	NO
	43.72	NO
	24.5	NE
	24.5	SO
	31.15	NO
	31.15	SE

Por otro lado, la de sombra de cada de diversas maneras. Se tipos de sombras existe el factor de largo del año, que las fachadas principales fachadas acristaladas.

Además, estas últimas estores interiores cuyo factor de sombra se regula manualmente. Por otro lado, las ventanas de la fachada principal de la planta baja sufrirán el sombreado provocado por la sección de la primera planta que se encuentra en voladizo respecto a ellas. Por último, se definirán, en el Simulation Studio de TRNSYS, sombras provocadas por objetos externos en las diferentes ventanas.

definición de los factores ventana se lleva a cabo han diferenciado cuatro distintas. Por un lado, sombra, constante a lo lamas metálicas de las provocan en dichas

disponen también de

En las definidas como “fachadas principales” (ver Anexo III), se calcula el factor de sombra provocado por las lamas metálicas exteriores que ocultan las ventanas de dichas fachadas. En la siguiente imagen se observa la foto realizada desde el interior de una consulta de la primera planta del edificio, orientada al sureste. En ella pueden contabilizarse 5 lamas metálicas. Este número es coherente con el número total de lamas situadas en dicha fachada, ya que se contabilizan 50 lamas metálicas en una longitud en la que se sitúan 10 consultas de igual tamaño. El factor de sombra que se mide es de 0.35, el cual se asigna a la totalidad de las fachadas principales (orientadas al sureste y noreste en la primera y segunda planta) como factor de sombra exterior, exceptuando una pequeña longitud de pasillo en ambas plantas que no sufrirá esta sombra.



**Ilustración 22: factor de sombra provocado por las lamas metálicas en una consulta.**

Al mismo tiempo, en la imagen anterior puede observarse el estor (alzado previamente con el objetivo de obtener la fotografía) del que disponen todas las consultas de las fachadas principales. A la hora de introducir la influencia de dichos estores, se decide hacer uso del type 141 en el Simulation Studio, denominado “Cooling Season”. Mediante este type, con ayuda de



una calculadora, se define que durante el verano las ventanas tendrán un factor de sombra de 0.8, mientras que en invierno dicho factor sería nulo.

Para la definición del periodo de “verano” se hace uso de lo indicado en el Anexo III del documento “Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER. Anexos”, del IDAE. Se define como verano el periodo que va desde el último domingo de marzo hasta el último sábado de octubre.

El tercer tipo de sombreado se define únicamente para las primeras cuatro sombras, todas ellas pertenecientes a la planta baja, como puede observarse en la ilustración 23. Este factor de sombra es debido al saliente de la primera planta, dispuesto en voladizo sobre las ventanas de la fachada principal de la planta baja. En la siguiente imagen, tomada desde el vestíbulo de la planta baja, puede observarse el saliente mencionado.



**Ilustración 23: sombreado debido al retranqueo de la planta baja respecto a la primera planta.**

Para la definición de esta sombra en cada una de las cuatro ventanas mencionadas se hace uso del type 34 en el Simulation Studio, válido para definir este tipo de salientes.

Por último, se calcula, para el resto de ventanas, el factor de sombra debido a objetos externos. También se calcula para las ventanas número 3 y 4, y se le suma al factor de sombra debido al saliente y definido previamente.

Para ello, se hace uso del type 68 en el Simulation Studio, al cual debe adjuntarse un archivo externo con todos los valores de los ángulos requeridos por dicho type para el cálculo del sombreado. Los obstáculos externos se introducen mediante ángulos de altura angular. La siguiente tabla resume los ángulos considerados para cada ventana.

**Tabla 11: ángulos de altura angular de los obstáculos en cada sombreado definido en TRNSYS.**

	NE	SE	SW	NW
<b>Sombra 3</b>	0º	0º	13.33º	46º
<b>Sombra 4</b>	13.33º	0º	0º	46º
<b>Sombra 5</b>	2.86º	0º	0º	0º
<b>Sombra 6</b>	15.65º	0º	32º	30º
<b>Sombra 7</b>	15.65º	0º	25º	5.76º
<b>Sombra 8</b>	0º	35º	19.5º	6.1º
<b>Sombra 9</b>	21.47º	0º	21.47º	11.8º
<b>Sombra 10</b>	0º	27.6º	11.1º	27.6º
<b>Sombra 11</b>	21.47º	0º	21.47º	14º
<b>Sombra 12</b>	11.1º	27.6º	0º	27.6º
<b>Sombra 13</b>	21.47º	14º	21.47º	0º
<b>Sombra 14</b>	38º	45º	38º	45º

### 9.2.2.10. Puentes térmicos

El Código Técnico de la Edificación define el puente térmico como la “zona de la envolvente térmica del edificio en la que se evidencia una variación de la uniformidad de la construcción, ya sea por un cambio del espesor del cerramiento o de los materiales empleados, por la penetración completa o parcial de elementos constructivos con diferente conductividad, por la diferencia entre el área externa e interna del elemento, etc., que conllevan una minoración de la resistencia térmica respecto al resto del cerramiento.”

En resumen, puede definirse como la zona de la envolvente donde el calor se transmitirá más fácilmente, zona que es fundamental reducir si se desea minimizar las pérdidas de calor al exterior. Se trata también de zonas susceptibles de provocar condensaciones.



Ilustración 24: termografía de un edificio que muestra diferentes puentes térmicos.

La forma más común de expresar la magnitud de un puente térmico es mediante su transmitancia térmica lineal,  $\Psi$  (W/mK). Es necesario multiplicar esta última por la longitud de dicho puente térmico para poder conocer las pérdidas de calor que tienen lugar a través de él. Dichas pérdidas se añaden a aquellas que tienen lugar a través de la superficie de la envolvente, cuantificadas estas últimas mediante la transmitancia térmica,  $U$ , del cerramiento.

Los puentes térmicos presentes en el presente edificio se enumeran a continuación:

Tabla 12: transmitancia térmica lineal de cada puente térmico del edificio analizado.

Puente térmico	$\psi$ (W/mK)
Encuentro suelo exterior-fachada	0.44
Unión solera-pared exterior	0.13
Encuentro forjado-fachada	-0.03
Encuentro cubierta-fachada	0.44
Esquina saliente	0.16
Esquina entrante	-0.13
Pilar	0.05
Hueco ventana	0.25

Se observa que existen dos tipos de puente térmico que tienen un valor de transmitancia térmica lineal negativo. Esto quiere decir que por dichos puentes térmicos en realidad no se tendrán más pérdidas de calor que por la superficie uniforme de la envolvente, sino menos. Es relativamente común en esquinas entrantes, y está relacionado con que el superficie exterior de dichas esquinas es menor que la superficie interior.

A la hora de introducir los puentes térmicos en TRNBuild existen ciertas limitaciones. La forma de introducirlos no es asociándolos a cerramientos concretos, sino que es mediante la definición de cerramientos virtuales de tipo “Coldbridge”, definiendo  $\Psi$  en vez de la transmitancia térmica (U) y la longitud del puente térmico en vez de la superficie de una pared.

Además, TRNBuild no permite introducir valores de puentes térmicos negativos. Es por ello que los dos tipos de puentes térmicos que muestran esos valores negativos no se definen, distribuyéndose el resto de la forma que muestran las imágenes del Anexo IV.

### 9.2.3. Escenarios

#### 9.2.3.1. Ganancias internas

Las ganancias internas que tendrán lugar en cada una de las zonas térmicas pueden dividirse en ganancias debidas a la ocupación del edificio (calor desprendido por los humanos) y en ganancias debidas a los equipos que se encuentren en dichas zonas.

Para la estimación de ambas ganancias se hace uso de lo indicado en el Documento Básico “Ahorro de energía” del Código Técnico de la Edificación <sup>[18]</sup>. En el apartado de calificación energética de la memoria del proyecto de construcción del edificio se considera a este último como edificio con perfil de uso “Intensidad Alta”. Se comprueba que está abierto al público 12 horas diarias, de 8:00 a 20:00. Es por ello que se decide considerarlo en el presente estudio con el perfil de uso “Intensidad Alta – 12h”.

En dicho perfil de uso, el CTE indica que las ganancias internas debidas a equipos corresponderán a 7.5 W/m<sup>2</sup> de superficie útil, durante el tiempo que el edificio esté abierto al público y en funcionamiento. Estas ganancias no se considerarán en las zonas térmicas pertenecientes al sótano, ya que no existirán este tipo de equipos.

Por otro lado, para el cálculo de las ganancias internas debidas a ocupación, se indica que deben considerarse 10 W/m<sup>2</sup> de ocupación sensible y 6.31 W/m<sup>2</sup> de ocupación latente. Se tienen por tanto 16.31 W/ m<sup>2</sup> en total, y será con este valor con el que se deduzca el perfil de ocupación del edificio.

Para ello, se utiliza el valor que proporciona el volumen 6 de la guía de TRNSYS 16 <sup>[19]</sup> de 100 W/persona para el caso en el que no se realice ninguna actividad física, considerado como “sited at rest”. Este valor se desglosaría en 60 W de calor sensible y 40 W de calor latente, lo que es coherente con la proporción de ambas contribuciones que considera el CTE y que se ha mencionado previamente. La siguiente tabla muestra el perfil de ocupación que se obtendría realizando las consideraciones expuestas.

Tabla 13: perfil de ocupación y ganancias debidas a equipos considerando el DB Ahorro de Energía del CTE.

Zona térmica	Superf. útil (m <sup>2</sup> )	Personas	Equipos (W)
Sótano frío	130	22	
Sótano calefactado	130	22	
Planta baja	652.18	109	4891
Primera planta	735.56	123	5517
Segunda planta	706.67	118	5300

Sin embargo, en la visita al Centro de Salud se comprueba que la ocupación mostrada en la tabla previa esta sobreestimada, tanto en la planta baja como en las dos plantas superiores.

Además, la mayor parte del tiempo no se encuentra nadie en el sótano. Por ello, se decide estimar dicha ocupación a partir de otro documento del CTE, tratándose en este caso del Documento Básico “Seguridad en caso de incendio”.

La sección SI 3 <sup>[22]</sup>, denominada “Evacuación de ocupantes”, indica una densidad de ocupación correspondiente a edificios de uso hospitalario de 2 m<sup>2</sup> por persona para el caso de “salas de espera”, y 10 m<sup>2</sup> por persona para espacios de “servicios ambulatorios y de diagnóstico”.

Por lo tanto, se miden las superficies correspondientes a cada tipo de espacio en cada zona térmica, obteniéndose los resultados mostrados por la siguiente tabla. Debe añadirse que no se ha considerado ninguna clase de ocupación en ambas zonas térmicas del sótano.

Tabla 14: perfil de ocupación resultante de considerar el DB Seguridad en caso de incendio del CTE.

Zona térmica	Salas de espera (m <sup>2</sup> )	Consultas (m <sup>2</sup> )	Total personas
Planta baja	149	184	92
Primera planta	121	311	91
Segunda planta	121	324	92

Se observa que mediante este último cálculo se obtiene un grado de ocupación menor del edificio. Se considera que esta ocupación se parece más a la observada en la visita realizada, por lo que se decide introducirla en la simulación del edificio realizada.

Existen también otras dos razones por las que se decide realizar la simulación con estos valores. En primer lugar, para cumplir las indicaciones del CTE para edificios de este tipo, tal y como se ha explicado previamente. En segundo lugar, porque posteriormente la ventilación calculada con dichos valores se encuentra dentro de valores comunes.

La siguiente tabla resume las ganancias internas consideradas finalmente en la definición del edificio en TRNBuild.

Tabla 15: perfil de ocupación y ganancias por equipos introducidas en TRNSYS.

Zona térmica	Personas	Equipos (W)
Planta baja	92	4891
Primera planta	91	5517
Segunda planta	92	5300

### 9.2.3.2. Calefacción

El escenario de calefacción se define para las cuatro zonas térmicas del edificio calefactadas. Para la definición de la temperatura mínima de consigna durante los periodos de tiempo en los que el edificio está abierto y en funcionamiento se hace uso de la temperatura operativa de diseño para invierno considerada en el proyecto de construcción, de 22°C.

Se define un escenario de calefacción en el que no se fija ninguna temperatura de consigna para las horas de noche y fines de semana, cuando el edificio estará cerrado al público. Se comprueba que con la potencia de calefacción de la instalación actual no existe ningún problema para alcanzar la temperatura de consigna de manera rápida en la hora de apertura al público del edificio.

### 9.2.3.3. Refrigeración

A pesar de que en el presente trabajo no se tiene como objetivo analizar la demanda de refrigeración ni el sistema instalado para satisfacerla, las primeras simulaciones del edificio muestran la obligación de definir una refrigeración para obtener unos resultados óptimos.

La razón es que en caso de no definir ningún sistema de refrigeración, y debido a la gran superficie acristalada del edificio que permite la entrada de importantes ganancias solares en verano, las temperaturas que se alcanzarían en el interior del edificio serían muy altas en los meses de verano. Esto provoca que durante un largo periodo de tiempo posterior a esos meses de verano el edificio pierda lentamente ese calor y aun conserve valores de temperatura interior irrealmente altos, por lo que la simulación muestra valores de calefacción reducidos durante ese periodo.

La siguiente imagen muestra cómo en caso de no introducir ninguna refrigeración, el edificio muestra valores de temperatura muy altos para los meses centrales del año, correspondientes al periodo de verano. Tras estos meses, las zonas térmicas perderían temperatura lentamente, ya que se trata de un edificio nuevo con un valor de transmitancia térmica de la envolvente muy pequeño.

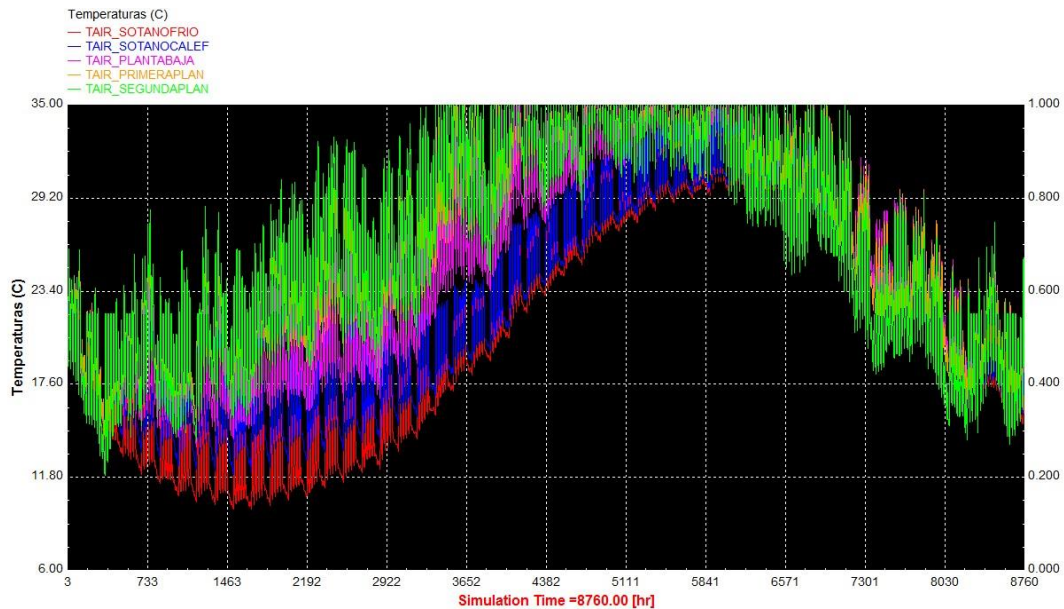
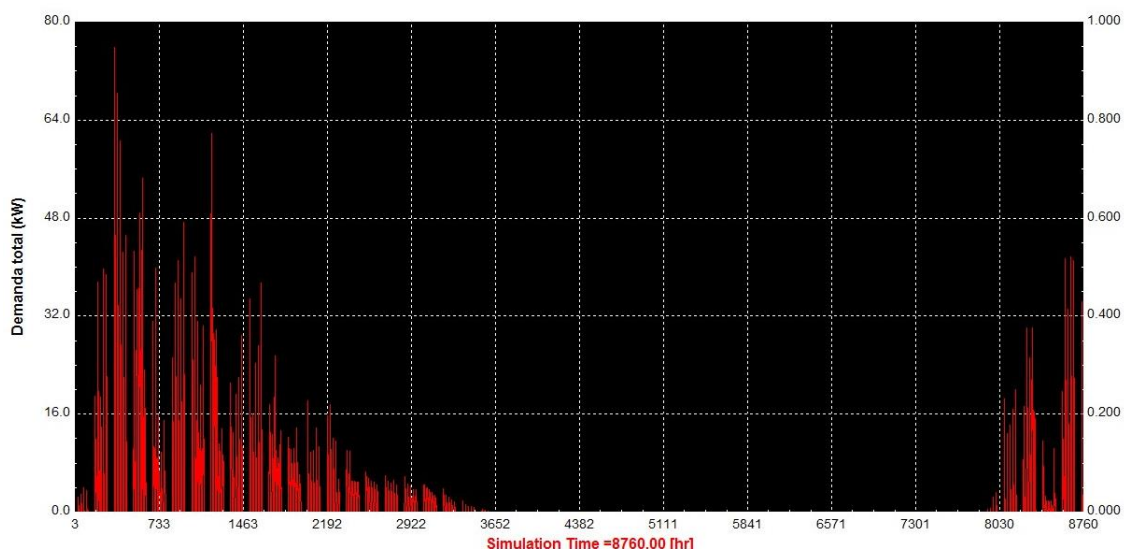


Ilustración 25: evolución de las temperaturas de cada zona térmica en caso de no definir ninguna refrigeración.

La influencia que lo indicado tiene en la demanda de calefacción se comprueba en la siguiente imagen, donde se observa que la demanda total de calefacción permanece en valores nulos al finalizar el periodo de verano y hasta bien entrado noviembre.



**Ilustración 26: evolución de la demanda de calefacción en el caso de no definir ninguna refrigeración.**

Se introduce, por lo tanto, una refrigeración que limita la temperatura interior a 26°C en los meses de verano, con el objetivo de obtener resultados más realistas.

#### **9.2.3.4. Ventilación**

La categoría de calidad de aire interior (IDA) a alcanzar como mínimo en un edificio se define en función del uso de dicho edificio. Al ser el edificio analizado un Centro de Salud, la ventilación del edificio debe garantizar una calidad de aire tipo IDA 1 (correspondiente a hospitales y clínicas), denominado como “Aire de óptima calidad” y que requiere de un caudal de 20 m<sup>3</sup>/h por persona.

Por lo tanto, para definir el caudal de ventilación de una zona térmica es necesario conocer el número de personas que se encuentran en ella. En la cálculo realizado en el presente trabajo, se considera el perfil de ocupación definido previamente para la estimación de ganancias internas, de manera que el caudal de aire resultante se introduce en TRNBuild en forma de renovaciones hora (1/h).

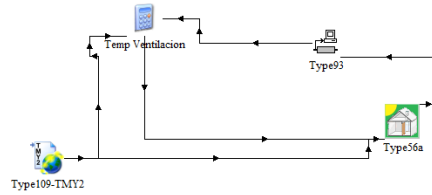
Se obtiene un valore del 60% para la planta baja, primera planta y segunda planta. Este valor de ventilación también se define para el sótano (para el que recordemos que no se define ocupación). Además, siguiendo lo indicado por el CTE, no se define ninguna ventilación para los periodos de tiempo en los que el edificio está cerrado.

El sistema de ventilación del edificio posee un Recuperador de Doble Batería que permite recuperar un 45% de la energía contenida en el caudal de extracción. Esta recuperación de energía reducirá la demanda de calefacción del edificio, por lo se introduce en el Simulation Studio de la siguiente manera.

Se considera que se recupera el 45% de la energía contenida en el caudal de extracción siempre que no conlleve un aumento de la temperatura del aire entrante hasta una temperatura mayor que la interior del edificio. En ese caso se limita la recuperación de calor hasta una temperatura máxima del caudal entrante igual a la temperatura interior del edificio.

Esto se hace con un retraso de un periodo de tiempo en la simulación, de manera que se hace uso del type 93 para guardar los valores de temperatura interior del edificio de un periodo de

tiempo hasta el siguiente periodo. Con ayuda de una calculadora y en función de la temperatura ambiente se calcula la temperatura final de entrada del caudal entrante de ventilación.



**Ilustración 27: esquema definido en TRNSYS para la simulación de la recuperación de calor del sistema de ventilación.**

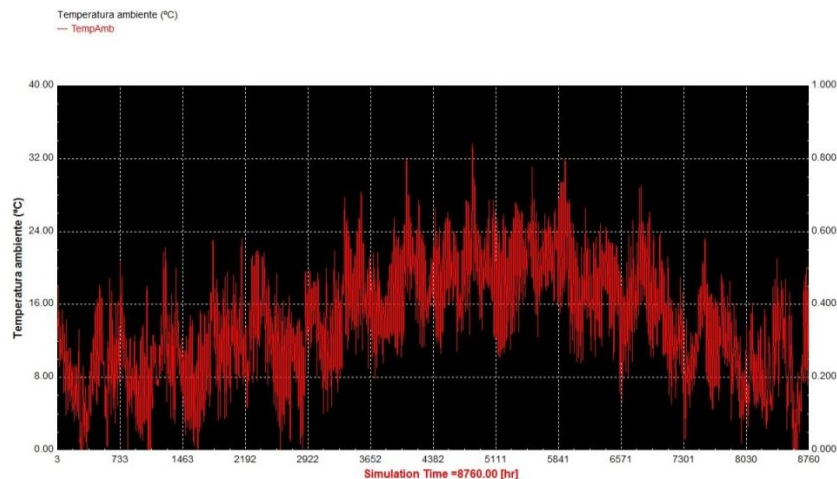
### 9.2.3.5. Infiltración

El valor de la infiltración debe introducirse en la forma de fracción de volumen de la zona térmica que se infiltra en dicha zona cada hora. Se considera un valor de 0.1 [1/h], que es sensiblemente inferior a los valores típicos de entre 0.2-0.3 que suelen considerarse comúnmente, pero que es el valor que proporciona el documento del IDAE “Condiciones de Aceptación de Procedimientos Alternativos a LIDER y CALENER” [20] para “Espacios habitables en edificios de otros usos” que no son vivienda.

### 9.2.4. Otras consideraciones de la simulación dinámica

A la hora de considerar las condiciones ambientales que existen cada hora del año, se hace uso de la base de datos de *Meteonorm* para el aeropuerto de Sondika (Bizkaia). Dicha localidad es muy cercana al edificio estudiado. Los datos, en formato TMY2, se introducen como archivo externo en el Simulation Studio mediante el type 109, que a su vez calcula la radiación directa, difusa y reflejada en cada una de las orientaciones de superficies del edificio que se introducen.

De esta manera, la siguiente imagen muestra la evolución anual considerada de la temperatura del ambiente exterior en la simulación.

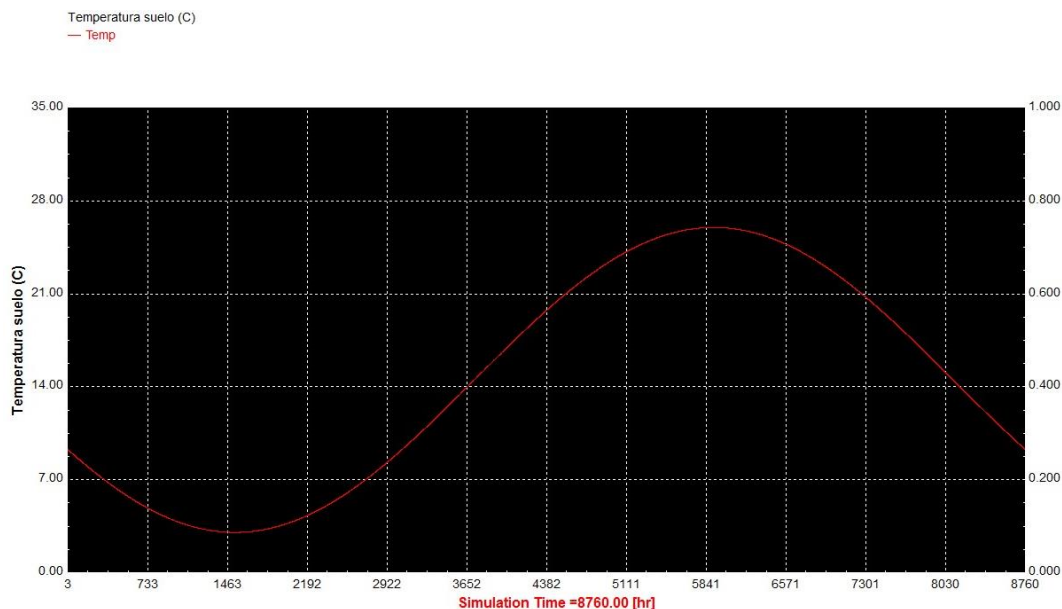


**Ilustración 28: evolución de la temperatura ambiental considerada en la simulación.**

Por otro lado, es necesario también conocer cuál es la variación de la temperatura del terreno con el que estarán en contacto los cerramientos bajo rasante del edificio. Para ello, se utiliza el type 77 del Simulation Studio, en el que además de las características del terreno (densidad,

calor específico...) es necesario introducir la temperatura superficial media a lo largo del año y su máxima amplitud.

A la hora de estimar estos valores se acude al documento del IDAE “Guía Técnica. Condiciones Climáticas Exteriores de Proyecto” [21], en el que se obtiene para Gipuzkoa (aeropuerto de Hondarribia) una temperatura media de 15.4 °C y un amplitud máxima de 9.4°C. Se decide utilizar estos valores debido a la falta de datos correspondientes al aeropuerto de Sondika (Bizkaia). De esta manera, la siguiente imagen muestra la evolución anual de la temperatura del terreno.



**Ilustración 29: evolución de la temperatura del terreno considerada en la simulación.**

Por otro lado, a la hora de calcular la radiación de onda larga que intercambian las superficies exteriores del edificio con la atmósfera, TRNSYS utiliza la denominada “temperatura efectiva del cielo”, la cual es siempre menor que la temperatura ambiente. Para su cálculo se introduce el type 69, que a su vez requiere de las temperaturas de bulbo seco y punto de rocío para calcular el grado de nublado. Estas dos temperaturas se calculan mediante el type 33.

Por último, debe añadirse que TRNSYS muestra problemas a la hora de calcular las funciones de transferencia en el caso de cerramientos muy bien aislados y pesados, de manera que sobrepasa el límite del método de función de transferencia y muestra errores de estabilidad. Una opción para evitar esto podría ser simular las capas de aislante térmico como resistencias, sin masa. Sin embargo, con el fin de lograr fiabilidad en los resultados, se decide subir el valor del “timebase” de la simulación a tres horas, de manera que la simulación anual del edificio comenzará en la tercera hora del año y en vez de para 8760 horas, la simulación se realiza para 8758 horas.

### 9.2.5. Agua Caliente Sanitaria

A menudo, el consumo de ACS se corresponde con el perfil de demanda más difícil de definir a la hora de evaluar un edificio energéticamente. La gran dependencia que muestra respecto a los hábitos y conductas de los usuarios hace que sea complicado construir perfiles horarios tipo.



Además, a pesar de que en el análisis más común, referido a edificios de viviendas, existen ciertos perfiles de consumo de ACS que pueden utilizarse, en el caso de edificios del sector terciario la falta de datos es más acuciante.

Es necesario, por lo tanto, proponer un perfil de consumo, que se tratará de justificar a continuación.

La sección HE 4 del Documento Básico “Ahorro de Energía” del CTE proporciona un valor de consumo de ACS de 41 litros por persona y día, correspondiente para “Clínicas y Ambulatorios”. No se especifica a qué tipo de persona hace referencia, si a los profesionales que realizan su jornada laboral en ese tipo de edificios o también a los usuarios que acuden diariamente a ellos.

No obstante, esta fuera de toda lógica considerar que el público en general que acude a un centro de salud consume tal cantidad de agua caliente. Es por ello que en el presente trabajo se considera que el citado consumo corresponderá a cada trabajador del centro.

En el plan funcional del proyecto arquitectónico del edificio puede obtenerse la distribución de la plantilla del centro, que sería de 31 personas. La siguiente tabla muestra dicha distribución.

**Tabla 16: distribución de la plantilla del edificio.**

	Mañana	Tarde	Total
<b>Medicina General</b>	6	4	10
<b>Pediatría</b>	1	1	2
<b>Enfermería</b>	7	4	11
<b>Auxiliar clínica</b>	1	0	1
<b>Atención al cliente</b>	5	2	7

El 65% de la plantilla total trabajaría por la mañana y el 35% restante por la tarde, siendo el consumo total diario de 1271 litros. A la hora de distribuir dicho consumo mediante un perfil horario, se realizan las siguientes consideraciones.

- Se considera que el 50% de la demanda está distribuida uniformemente en el tiempo de apertura del centro de salud, formando una base de consumo constante a lo largo de las doce horas del horario de apertura.
- El 50% restante se considera que se consume en la última hora de cada turno (mañana y tarde), cuando los profesionales pueden ducharse en los vestuarios del sótano al finalizar su jornada laboral. Análogamente a la distribución de la plantilla, el 65% de este consumo se define a última hora de la mañana y el 35% restante a última hora de la tarde.

De este modo, se consigue un perfil de demanda de ACS como el que muestra la siguiente imagen, correspondiente a tres días laborales cualesquiera consecutivos.

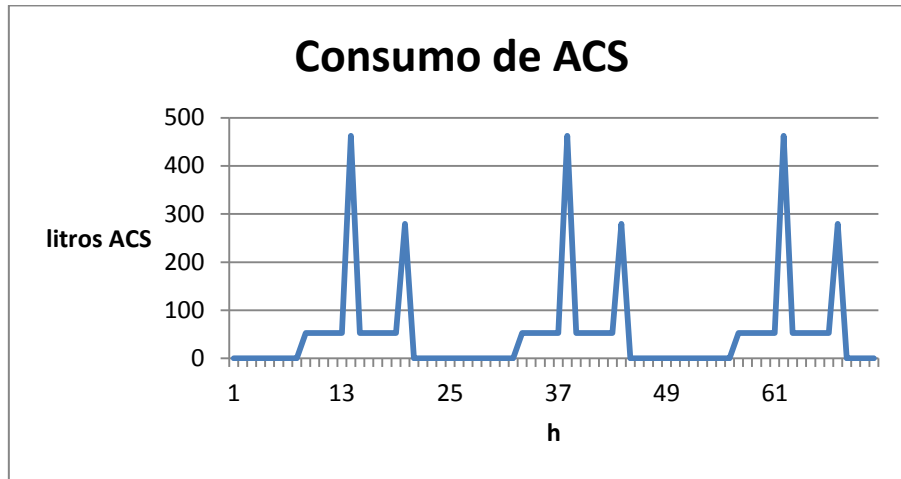


Gráfico 3: perfil de consumo considerado de ACS, durante tres días consecutivos.

### 9.3. Instalación

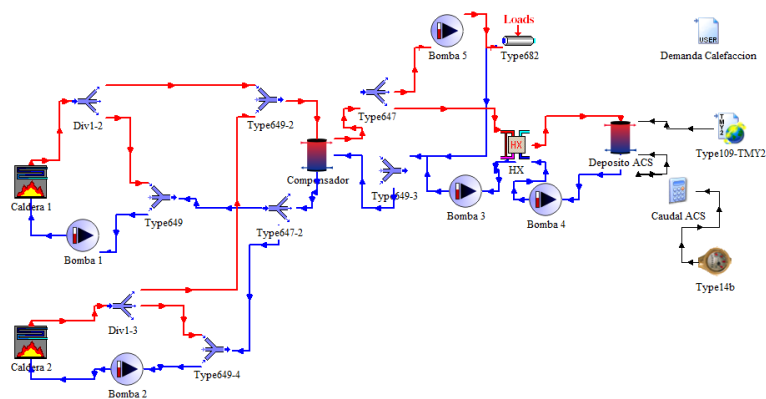
La instalación que se considera está basada en dos calderas de condensación. De esta manera se hace frente tanto a la demanda de calefacción como a la de ACS. La primera se introduce mediante un archivo de texto externo que se ha obtenido de la simulación previa del edificio. La segunda se introduce mediante una función dependiente del tiempo en el type 14.

El rendimiento energético que se define en ambas calderas se obtiene de la *Guía Básica* para calderas de condensación de la Comunidad de Madrid <sup>[23]</sup>. En él, el rendimiento mínimo que se define para una caldera de condensación viene dado por la siguiente relación.

$$\eta = C_1 + \log q_u \quad (23)$$

Siendo  $q_u$  la energía útil proporcionada al agua y  $C_1$  una constante que depende de las temperaturas de retorno e impulsión. En el caso de trabajar con un salto térmico de 80/60 °C,  $C_1$  tomaría un valor de 91, mientras que trabajando a 45/35 °C,  $C_1$  sería 97.

La siguiente imagen muestra el esquema de la instalación, con los conductos de impulsión marcados de color rojo y los de retorno de azul. En la parte izquierda pueden diferenciarse los dos puntos de generación (las calderas), cada uno con su bomba de circulación. Al designarse ambas calderas para trabajar con temperaturas de retorno e impulsión concretas, es necesario introducir dos válvulas de tres vías en cada circuito de generación, de manera que exista la posibilidad de realizar un bypass desde la impulsión de la caldera al conducto de retorno y obtener las temperaturas de consigna en el retorno.



**Ilustración 30: esquema de la instalación introducida en TRNSYS.**

Se observa que entre los dos puntos de generación, y separando ambos circuitos de los circuitos de consumo, se encuentra el colector de impulsión. En TRNSYS se ha definido como un depósito y cuatro válvulas de tres vías, de manera que pueda enlazarse con los cuatro circuitos conectados a él. Por una toma de este colector saldrá el agua de calefacción, mientras que por otra el agua se envía al intercambiador de calor utilizado para calentar el ACS.

Se observa que cada circuito independiente tiene su propia bomba hidráulica, cada una de la cual se utilizará para introducir el control de la instalación.

### 9.3.1. Control de la instalación

En este punto se presenta el control de la instalación introducido en TRNSYS, para lo que se ha hecho uso de las bombas hidráulicas.

- Debido a obligaciones sanitarias, la temperatura del depósito de ACS no puede disminuir por debajo de 60°C. Por ello, se establece que el cuándo la temperatura del tanque disminuya por debajo de los 62°C las calderas entren en funcionamiento. Una vez en funcionamiento, el ACS del tanque se calentará hasta los 80°C y una vez que los alcance el calentamiento del depósito finalizará. Para ello se hace uso del type 2, que proporciona un control diferencial.
- A su vez, se establece también un control en el intercambiador de calor. Este intercambiador proporciona la opción de realizar un bypass de la parte caliente, de manera que el agua que proviene de ella pueda devolverse directamente al colector de impulsión. Dicho bypass se activará cuando la diferencia de temperatura entre ambos circuitos del intercambiador disminuya por debajo de los 2°C, de manera que hasta que como mínimo exista dicha diferencia no se calentará el agua del circuito frío con el agua del circuito caliente.
- En los circuitos de generación, existirá una fracción del flujo de impulsión que deba ser dirigida directamente mediante bypass al conducto de retorno, de manera que a la entrada de la caldera pueda obtenerse la temperatura de retorno de consigna. Esa fracción de flujo se calcula en función de las temperaturas de retorno del colector y de impulsión de la caldera.
- Las calderas trabajaran con saltos térmicos y temperaturas de retorno e impulsión concretas. En caso de existir demanda de calentamiento del depósito de ACS, se establece la consigna de trabajo de 80/60 °C. Si solo existe demanda de calefacción, dicho salto térmico será de 45/35 °C.

- La segunda caldera solo entrará en funcionamiento durante los periodos en los que la primera caldera no sea suficiente para hacer frente a la demanda por sí sola.

En la siguiente imagen se muestran, con líneas punteadas, las conexiones utilizadas para establecer el control de la instalación.

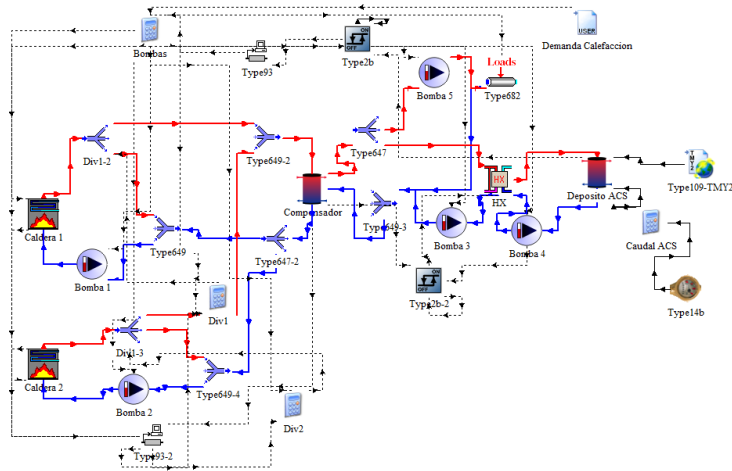


Ilustración 9.3.1.1: conexiones definidas en TRNSYS para la definición del control de la instalación.

### 9.3.2. Nivel de agregación

Para la realización del análisis exergético de la instalación, es necesario establecer un nivel de agregación óptimo de los equipos, de manera que permita localizar los focos de mayores irreversibilidades pero no requiera del manejo de un número excesivamente alto de flujos. En el presente trabajo, el nivel de agregación considerado se muestra en el siguiente esquema.

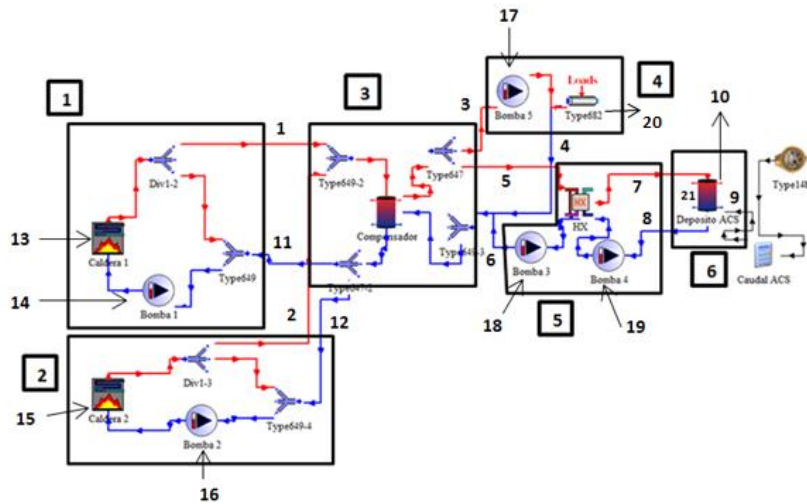


Ilustración 31: nivel de agregación de la instalación considerado en el análisis exergético.

De esta manera, se definen un total de 6 equipos y 21 flujos. Los primeros 12 flujos son flujos másicos de agua, siendo el flujo 10 el ACS impulsada a consumo. Los flujos 13 y 15 son de gas natural y los flujos 14, 15, 16, 17, 18 y 19 son electricidad alimentada a las bombas. Por último, el flujo número 20 hace referencia al calor aportado por la instalación de calefacción, y el número 21 es la energía que se almacena en el depósito de ACS.

Los componentes que se agrupan en cada uno de los equipos considerados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 17: componentes agrupados en cada uno de los equipos a considerar en el análisis.

Equipo considerados	Componentes agrupados
1 – Caldera 1	Caldera 1, 2 válvulas de 3 vías, bomba hidráulica
2 – Caldera 2	Caldera 2, 2 válvulas de 3 vías, bomba hidráulica
3 – Colector	Colector, 4 vías de 3 vías
4 – Carga de calefacción	Bomba hidráulica
5 – Intercambiador	Intercambiador, 2 bombas hidráulicas
6 – Depósito de ACS	Depósito de ACS

### 9.3.3. Proposiciones de la Termoeconomía

Para el análisis exergetico, es necesario distribuir, en cada equipo considerado, los flujos que entran y salen en flujos de fuel y de producto. Esta distribución es clave para la aplicación posterior de las distintas proposiciones de la Termoeconomía, así como para el cálculo de rendimientos exergeticos.

Tabla 18: definición de los fueles y productos considerados en cada equipo.

Equipo	Fueles	Productos
Caldera 1	13, 14	(1-11)
Caldera 2	15, 16	(2-12)
Colector	(1-11), (2-12)	(3-4), (5-6)
Carga de calefacción	17, (3-4)	20
Intercambiador	(5-6), 18, 19	(7-8)
Depósito de ACS	(7-8), 9, 21	10, 21

Se observa que en el depósito de agua caliente el flujo número 21 está incluido como fuel y como producto simultáneamente. La consideración realizada es la siguiente: dicho flujo se considerará siempre producto, excepto en los momentos en los que exista demanda de ACS y el circuito caliente del depósito esté parado.

Este último circuito, proveniente del intercambiador de calor (flujos 7 y 8) sólo entrará en funcionamiento cuando la temperatura del depósito baje de los 62 °C. Por ello, existen intervalos de tiempo en los que se tiene consumo de ACS pero no se tiene alimentación de calor al depósito, que actúa como si estuviese “aislado”. En esos intervalos, se considerará como fuel la disminución de energía y exergía que sufre el depósito para obtener como producto el flujo 10.

Al ser 6 los equipos considerados, serán 6 las ecuaciones que se obtienen con la primera proposición de la Termoeconomía, referida a los balances exergeticos en cada uno de los equipos. Se requieren, por lo tanto, 15 ecuaciones más para resolver el sistema. La segunda proposición nos permite obtener 8 ecuaciones más, y las 7 restantes se obtienen de la aplicación de la cuarta proposición.

La siguiente tabla nos muestra las ecuaciones auxiliares consideradas distribuidas por el equipo donde se aplican. El número entre paréntesis hace referencia a la proposición aplicada en cada caso.

Tabla 19: ecuaciones obtenidas de la aplicación de las proposiciones de la Termoeconomía.

Balances exergeticos en los equipos (1ª Proposición)	$B^*_1 - B^*_{11} = B^*_{13} + B^*_{14} + Z^*_1$ $B^*_2 - B^*_{12} = B^*_{15} + B^*_{16} + Z^*_2$
--	---

	$(B^*_3 - B^*_4) + (B^*_5 - B^*_6) = (B^*_1 - B^*_{11}) + (B^*_2 - B^*_{12}) + Z^*_3$ $B^*_{20} = B^*_3 - B^*_4 + B^*_{17} + Z^*_4$ $B^*_{17} - B^*_8 = (B^*_5 - B^*_6) + B^*_{18} + B^*_{19} + Z^*_5$ $B^*_{10} + B^*_{21} = (B^*_7 - B^*_8) + B^*_9 + Z^*_6$
<b>Equipo 1</b>	$B^*_{14} = B_{14} \quad (2)$ $B^*_{13} = B_{13} \quad (2)$
<b>Equipo 2</b>	$B^*_{15} = B_{15} \quad (2)$ $B^*_{16} = B_{16} \quad (2)$
<b>Equipo 3</b>	$\frac{B^*_3 - B^*_4}{B_3 - B_4} = \frac{B^*_5 - B^*_6}{B_5 - B_6} \quad (4)$ $\frac{B^*_{11}}{B_{11}} = \frac{B^*_1}{B_1} \quad (4)$ $\frac{B^*_{12}}{B_{12}} = \frac{B^*_2}{B_2} \quad (4)$
<b>Equipo 4</b>	$B^*_{17} = B_{17} \quad (2)$ $\frac{B^*_4}{B_4} = \frac{B^*_3}{B_3} \quad (4)$
<b>Equipo 5</b>	$B^*_{18} = B_{18} \quad (2)$ $B^*_{19} = B_{19} \quad (2)$ $\frac{B^*_6}{B_6} = \frac{B^*_5}{B_5} \quad (4)$
<b>Equipo 6</b>	$B^*_9 = B_9 \quad (2)$ $\frac{B^*_8}{B_8} = \frac{B^*_7}{B_7} \quad (4)$ $\frac{B^*_{10}}{B_{10}} = \frac{B^*_{21}}{B_{21}} \quad (4)$

En el caso del equipo 6, debido a la singularidad del flujo 21 comentada previamente, las ecuaciones mostradas hacen referencia a los intervalos de tiempo en los que dicho flujo actúa como producto.

Cuando actúe como fuel, el coste del flujo 21 se asigna igual al último coste que haya tenido previamente como producto. Si actúa ininterrumpidamente como fuel durante un mayor número de periodos de tiempo, ese último coste que haya tenido como producto se distribuye de manera uniforme a lo largo de dichos periodos.

#### 9.3.4. Costes

Los costes, tanto exergéticos como económicos, de los equipos considerados en el presente trabajo se han estimado a partir del Proyecto Fin de Máster “*Aplicación de la Termoeconomía a la instalación de un edificio de viviendas LowEx situado en Vitoria*”, de M<sup>o</sup> Florencia Zelis. En él, los costes exergéticos se han calculado mediante el software de análisis de ciclo de vida Simapro mediante la metodología de CExD.

Tabla 20: costes exergéticos y económicos considerados de los componentes de la instalación.

	Coste (kWh <sub>ex</sub> )	Coste (€)
<b>Caldera</b>	62834	15000
<b>Intercambiador</b>	998	2000
<b>Depósito ACS</b>	6250	5500

<b>Colector</b>	6250	7500
<b>Bomba hidráulica</b>	53	1000
<b>Circuito de suelo radiante</b>		20000

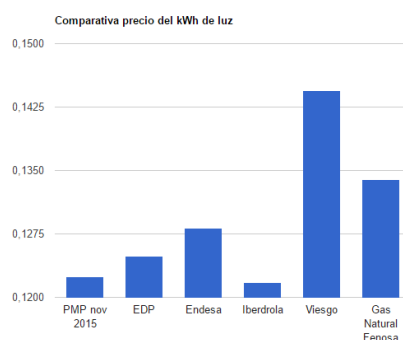
De esta manera, puede calcularse el coste para cada equipo considerado con el nivel de agregación presentado previamente. La siguiente tabla resume los valores utilizados en el presente trabajo en la aplicación de la Termoeconomía. En total, el coste económico de la instalación es de 70.000 €.

**Tabla 21: costes exergéticos y económicos totales de los equipos considerados en el análisis.**

	<b>Coste (kWh<sub>ex</sub>)</b>	<b>Coste (€)</b>
<b>Equipo 1</b>	62887	16000
<b>Equipo 2</b>	62887	16000
<b>Equipo 3</b>	6250	7500
<b>Equipo 4</b>	53	31000
<b>Equipo 5</b>	1104	4000
<b>Equipo 6</b>	6250	5500

A partir de estos costes, y una vez se conozca el número de horas en las que cada equipo está en funcionamiento a lo largo del año, podrá calcularse el valor de la amortización de cada equipo. En dicho cálculo se considera una vida útil de todos los equipos de 20 años, excepto en el caso del circuito de calefacción de suelo radiante en el que se considera una vida superior, de 40 años.

Por otro lado, a la hora de realizar el análisis económico es necesario conocer los costes de la electricidad y del gas natural. El siguiente gráfico muestra la comparativa del precio del kWh eléctrico en el mercado liberalizado en 2015 en función de la comercializadora. Por lo tanto, se decide considerar un precio de 12.5 c€/kWh en el análisis.



**Gráfico 4: comparativa del precio de 2015 del kWh de electricidad por comercializadora.**

En el caso del gas natural, se analiza el precio de la tarifa 3.4 que ofrecen diferentes comercializadoras, resumidos en la tabla siguiente. Finalmente se decide considerar un precio de 4.44 c€/kWh en el análisis económico.

**Tabla 22: comparativa del precio del kWh de gas natural por comercializadora.**

<b>Compañía</b>	<b>€/kWh</b>
<b>Gas Endesa</b>	0.045646
<b>Iberdrola</b>	0.040905
<b>Eon</b>	0.046700

## 10. Aspectos económicos

En el análisis económico del proyecto se contemplan todos los costes que han sido requeridos para la realización de este, desde la fase de planteamiento del problema, en la que se ha definido el alcance del proyecto y analizado la metodología a seguir, hasta la redacción de la memoria.

Los costes se distinguen en tres categorías:

- **Recursos humanos:** se trata del coste de las horas dedicadas a las distintas actividades, tanto por parte del autor del trabajo como del director del proyecto.

Tabla 23: distribución del coste de los recursos humanos por tareas realizadas.

Recursos humanos	Horas	Coste (€/h)	Coste (€)
Planteamiento del problema	10	20.00 €	200.00 €
Búsqueda bibliográfica	30	20.00 €	600.00 €
Aprendizaje del software	80	20.00 €	1,600.00 €
Recopilación datos del edificio	30	20.00 €	600.00 €
Realización de la simulación	100	20.00 €	2,000.00 €
Cálculos. Análisis de resultados	20	20.00 €	400.00 €
Redacción de la memoria	60	20.00 €	1,200.00 €
Consultas y revisión	20	40.00 €	800.00 €
		<b>TOTAL</b>	<b>7,400.00 €</b>

El siguiente gráfico muestra el calendario de duración de cada una de las fases del proyecto. Representa las fechas de inicio y la duración de cada una de las actividades programadas.

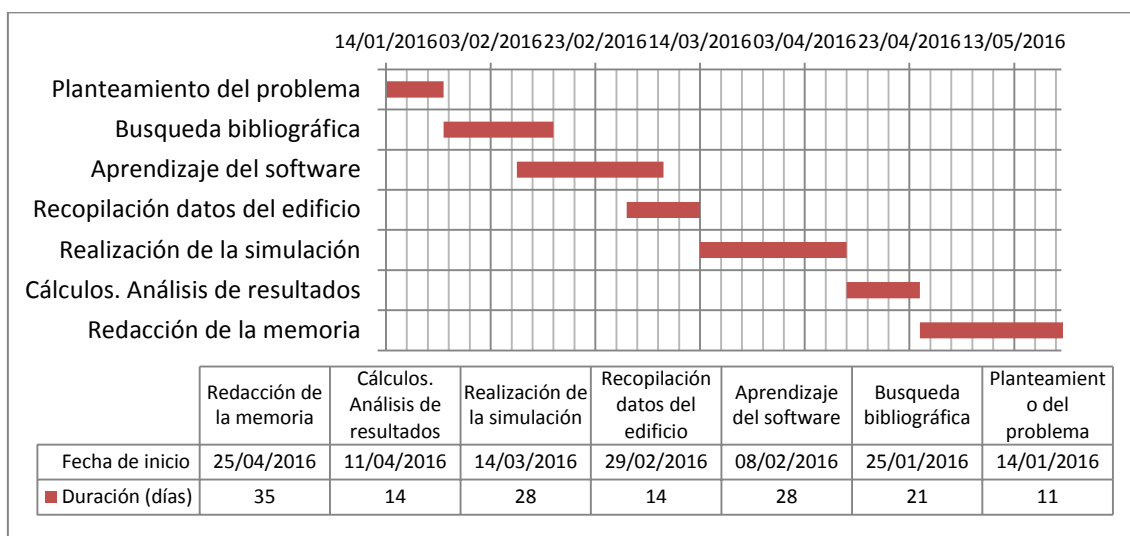


Gráfico 5: calendario de duración de las tareas realizadas.

- **Herramientas y material:** hace referencia a los costes relacionados con las herramientas utilizadas, el material informático y el material de oficina. Para ello se considera una vida útil del equipo informático de 4 años. En cuanto al material de oficina, consiste principalmente en el coste de la impresión de documentación necesaria para la realización del proyecto.



Tabla 24: distribución de los costes de herramientas y material.

Herramientas y material	Coste anual (€)	Coste (€/h)	Horas	Coste (€)
Ordenador personal	250.00 €	0.13 €	330	42.90 €
Material específico				20.00 €
<b>Software específico:</b>				
Licencia TRNSYS v.17	3,000.00 €	1.60 €	200	320.00 €
<b>TOTAL</b>				<b>382.90 €</b>

- **Servicios:** se trata de costes relacionados con una mayor profundización en conocimientos referidos a modelización de edificios y utilización de software.

Tabla 25: desglose de los costes de servicios.

Servicios	Coste (€/h)	Horas	Coste (€)
Asesoría arquitecto externo	40.00 €	2.00 €	80.00 €
Curso TRNSYS v.17			100.00 €
<b>TOTAL</b>			<b>180.00 €</b>

Finalmente, la siguiente tabla contiene un resumen de los costes finales. Se obtiene un coste total del proyecto de casi 8.000 €.

Tabla 26: resumen de costes del proyecto.

Concepto	Coste
Recursos humanos	7,400.00 €
Herramientas y material	382.90 €
Servicios	180.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>7,962.90 €</b>

## 11. Resultados

### 11.1. Simulación dinámica

La siguiente imagen muestra la variación de la demanda de calefacción total del edificio a lo largo del año. Se comprueba que la máxima potencia demandada es de 103 kW y que durante los meses de verano la demanda de calefacción es nula.

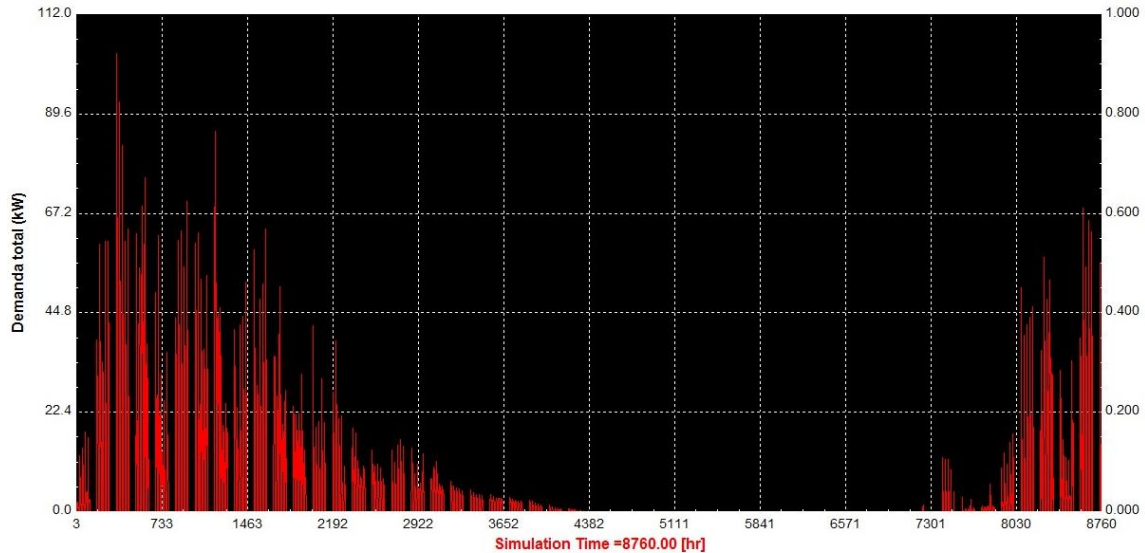


Gráfico 6: evolución de la demanda de calefacción del edificio.

En la siguiente imagen se muestra la influencia de la infiltración (línea roja) y la ventilación (línea azul) en la demanda de calefacción.

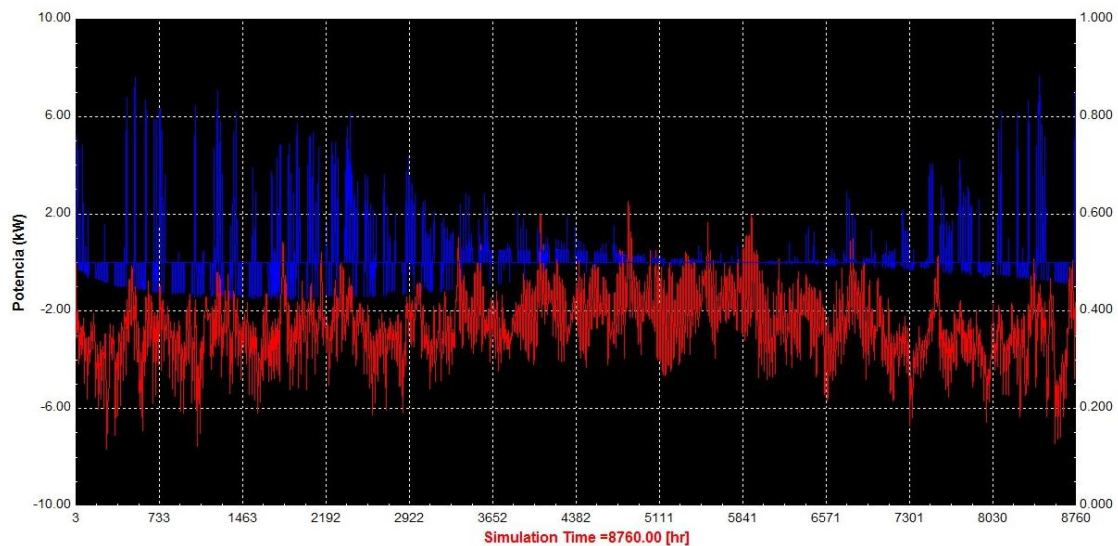


Gráfico 7: influencia de la infiltración (línea roja) y ventilación (azul) en la demanda de calefacción.

Cuando la contribución de alguna de ellas coge valor negativo, significa que están contribuyendo a aumentar la demanda de calefacción, mientras que cuando la potencia térmica que aportan es positiva contribuyen a calentar los espacios interiores del edificio. Durante los meses de verano es la infiltración la única que influiría en que hubiese demanda de calefacción, debido a las potencias negativas que muestra. Sin embargo, las ganancias internas

y las ganancias solares bastan para contrarrestar ese efecto (e incluso para calentar el edificio, tal y como se va a ver a continuación).

La ventilación se mantiene alrededor de valores prácticamente nulos durante el verano. Esto es debido a que cuando la temperatura del ambiente exterior es superior a 26°C, el aire entrante de ventilación se refrigera para limitarlo a esa temperatura máxima. Por ello, y debido a que, como puede observarse en la siguiente imagen, las temperaturas de las diferentes zonas térmicas calefactadas y refrigeradas se mantienen en torno a 26°C durante el día todo el verano, la influencia en términos de demanda de un aire de ventilación que entra a la misma temperatura a la que está el espacio interior es nula.

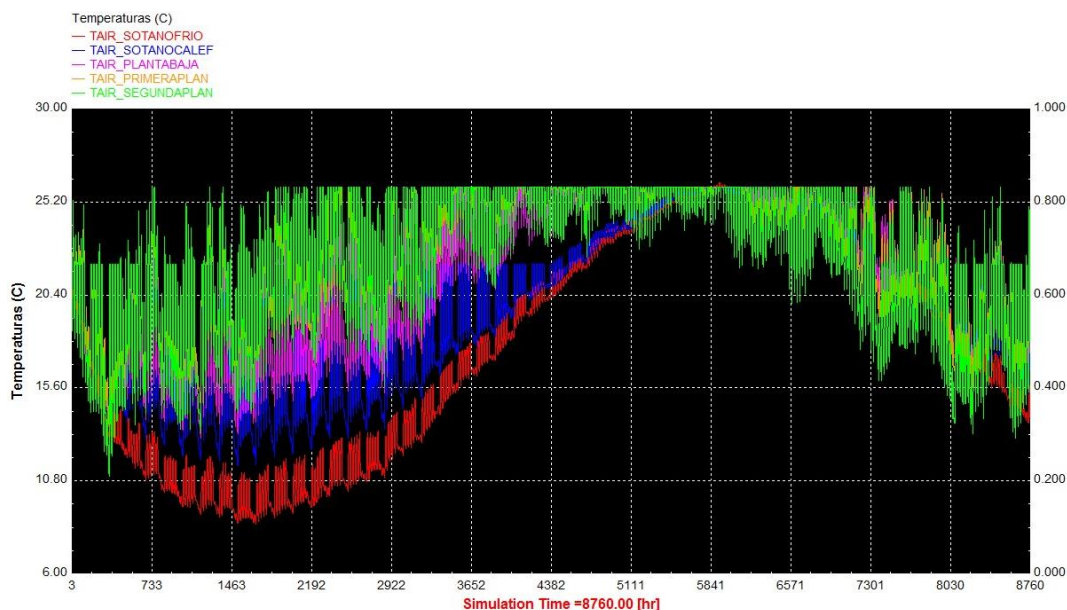


Gráfico 8: evolución de las temperaturas interiores por zona térmica.

Debe señalarse que la alta temperatura resultante a la que se mantiene el edificio a lo largo de todo el verano se corrobora en la realidad, ya que se hacen menciones de ese tipo en la visita efectuada al edificio por parte de personal de este último. No solo eso, sino que recientemente se han incluso replantado árboles en un parque situado enfrente del edificio con el objetivo de que en el futuro puedan aumentar el sombreado y reducir las altas temperaturas del Centro de Salud.

En la anterior imagen se observa también que la temperatura del sótano no calefactado y no refrigerado alcanza temperaturas más extremas a lo largo del año, estando considerablemente más frío en invierno y sobrepasando ligeramente en algún momento los 26°C en verano.

Los resultados también muestran una diferencia notable entre las temperaturas existentes simultáneamente en las distintas zonas. De esta manera, en la siguiente imagen se observa que en los primeros meses del año, periodo de invierno, la temperatura que se mantiene en el sótano calefactado y en la planta baja es la de consigna, 22°C.

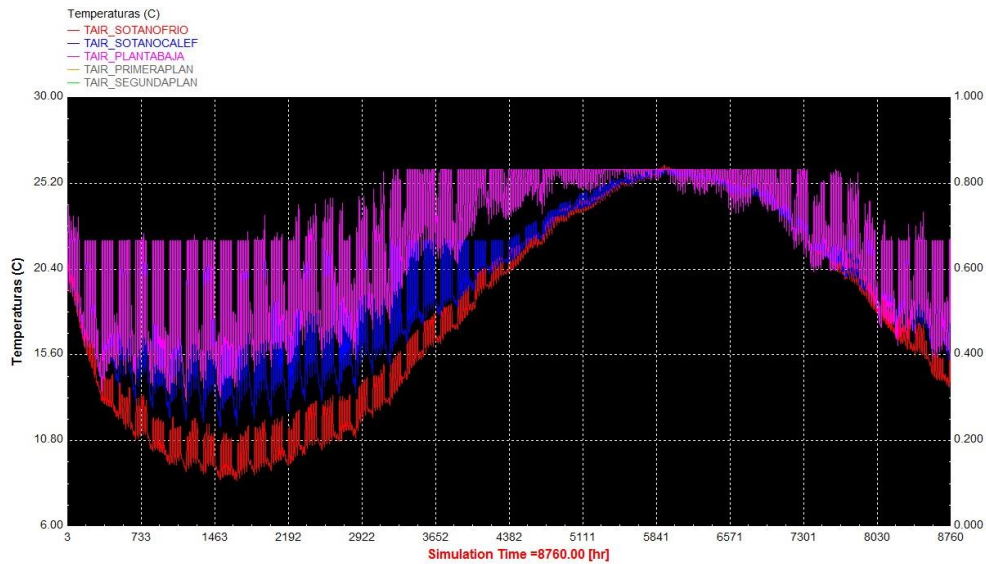


Gráfico 9: evolución de las temperaturas interiores de las zonas térmicas del sótano y planta baja.

Sin embargo, la siguiente imagen muestra cómo, a la vez, en ese periodo la segunda planta alcanza en algunos momentos temperaturas superiores, llegando a alcanzar durante algunas horas los 26°C de consigna máxima que se ha introducido.

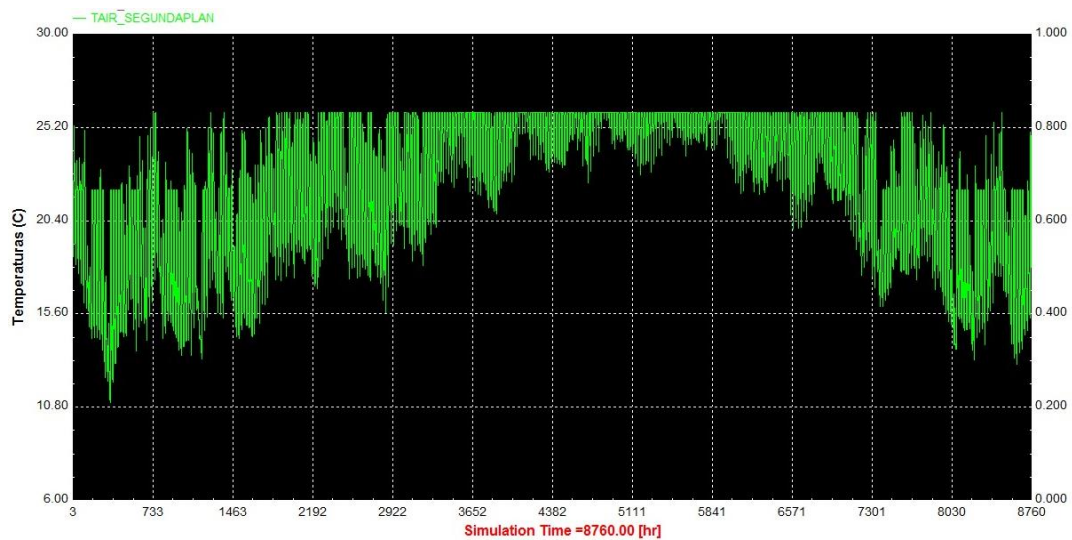


Gráfico 10: evolución de la temperatura interior de la segunda planta.

Si diferenciamos la demanda de calefacción por zonas térmicas, se obtiene la siguiente imagen. Se observa que el pico de potencia pertenece a la segunda planta en enero, y que es la demanda del sótano calefactado la que se mantiene hasta más tarde una vez comenzado el verano, debido por un lado a que no recibirá las ganancias solares a través de ventanas como el resto de las zonas térmicas y, por otro, a que el terreno con el que está en contacto tiene una variación de temperatura más lenta que la del ambiente exterior.

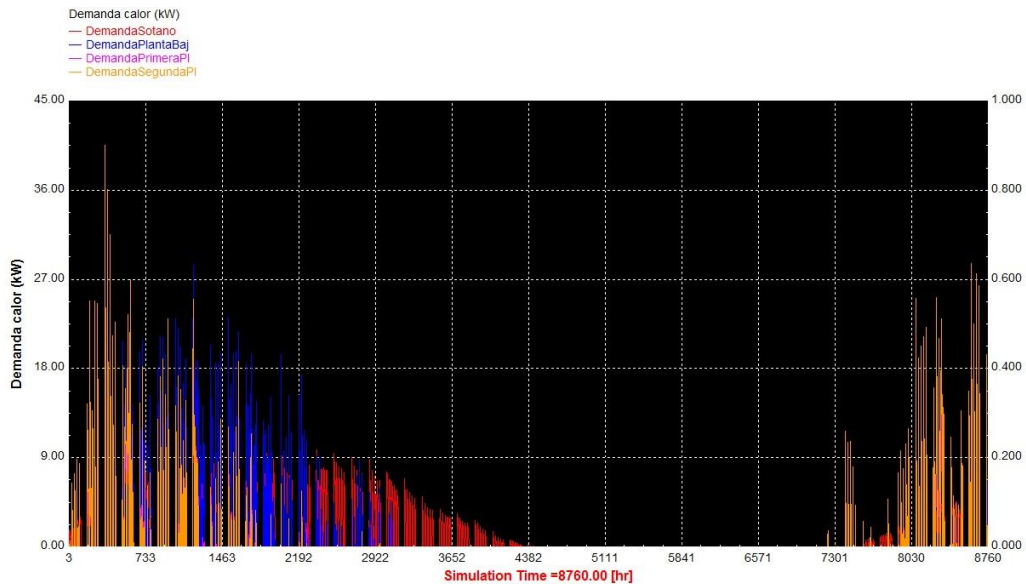


Gráfico 11: evolución de la demanda de calefacción por zona térmica.

Si se desglosa la demanda energética total mensualmente, se obtiene la siguiente figura. Los meses con mayor demanda de calefacción son, por este orden, enero, febrero y diciembre.

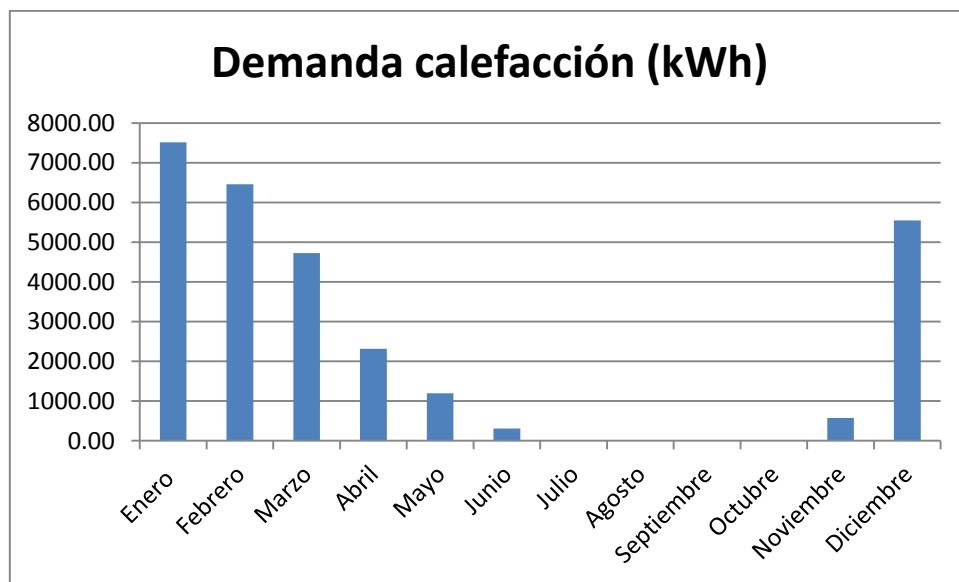


Gráfico 12: demanda de calefacción por mes.

En cuanto a la demanda energética de calefacción total, sin considerar la demanda de ACS, se tiene un valor de 28640.6 kWh anuales. Comparando este resultado con la demanda de calefacción estimada en el proyecto de construcción del edificio, se observa que es un valor muy similar, sensiblemente superior, puesto que aquella era de 24.984 kWh. El resultado obtenido, por lo tanto, es coherente con aquel de la memoria de construcción.

Tabla 27: demanda de calefacción por mes.

Mes	Demanda (kWh)
Enero	7513.55
Febrero	6454.31
Marzo	4723.89

<b>Abril</b>	2316.72
<b>Mayo</b>	1196.72
<b>Junio</b>	309.59
<b>Julio</b>	1.38
<b>Agosto</b>	0.00
<b>Septiembre</b>	0.00
<b>Octubre</b>	2.76
<b>Noviembre</b>	577.25
<b>Diciembre</b>	5544.43
<b>TOTAL</b>	<b>28640.60</b>

### 11.1.1. Influencia de los puentes térmicos

Al tratarse de un edificio con muy buen aislamiento y cerramientos con valores de transmitancia térmica pequeños, se decide analizar la influencia de los puentes térmicos en la demanda de calefacción, ya que puede ser mayor que la que comúnmente los puentes térmicos tienen.

Además, se trata de una manera de analizar si los dos puentes térmicos de transmitancia térmica lineal negativa que no se consideran debido a las limitaciones de TRNBuild pueden tener una importancia significativa o no.

La siguiente tabla muestra los valores de demanda de calefacción mensual obtenidos en el edificio dejando de lado sus puentes térmicos. Comparando el valor de la demanda de calefacción anual se comprueba que la introducción de los seis puentes térmicos definidos aumenta un 16.3% el valor de dicha demanda. En este caso, si no se consideran los puentes térmicos, la máxima demanda de calefacción sería menor, estando en 87 kW.

**Tabla 28: demanda de calefacción por mes modelizando el edificio sin puentes térmicos.**

<b>Mes</b>	<b>Demanda (kWh)</b>
<b>Enero</b>	6380.89
<b>Febrero</b>	5715.45
<b>Marzo</b>	4284.70
<b>Abril</b>	2141.51
<b>Mayo</b>	1160.03
<b>Junio</b>	304.48
<b>Julio</b>	1.02
<b>Agosto</b>	0
<b>Septiembre</b>	0
<b>Octubre</b>	0
<b>Noviembre</b>	322.26
<b>Diciembre</b>	4313.76
<b>TOTAL</b>	<b>24624.10</b>

Es por ello que es posible estimar una influencia no despreciable de los dos puentes térmicos que se dejan sin introducir. No será tan importante como la mencionada previamente, puesto que se trata de únicamente dos puentes térmicos no definidos hasta ahora y con valores de transmitancia menores, pero puede afirmarse que, con gran probabilidad, se trata de uno de

los factores de riesgo de los considerados previamente que más alejará los resultados de la realidad.

### 11.1.2. Influencia del sombreadamiento

El edificio objeto del análisis también muestra una fracción de ventana en sus fachadas muy alta: se trata de un edificio con mucha cristalera. Además, está construido en una zona de desnivel importante, introduciéndose en el terreno, y es por ello que se decide analizar el efecto de la introducción del sombreadamiento en la simulación.

La siguiente tabla muestra los valores de demanda de calefacción mensual y total en el edificio analizado, al no considerar ningún sombreadamiento de las ventanas, más allá del factor de sombra constante provocado por las lamas en las fachadas principales.

**Tabla 29: demanda de calefacción por mes modelizando el edificio sin sombreadamientos.**

Mes	Demanda (kWh)
Enero	6732.05
Febrero	5331.83
Marzo	3533.99
Abril	1787.54
Mayo	1060.30
Junio	255.18
Julio	0.15
Agosto	0
Septiembre	0
Octubre	0
Noviembre	417.73
Diciembre	4784.90
<b>TOTAL</b>	<b>23903.67</b>

El resultado muestra que la demanda de calefacción total anual sería inferior a la obtenida considerando el sombreadamiento. Es lógico, ya que las ganancias solares del edificio se reducen en caso de que exista un factor de sombra. Sin embargo, al ser un edificio con tanta porcentaje de ventana, la diferencia es considerable, aumentándose la demanda de calefacción un 19.8% debido a las diferentes sombras. La máxima demanda de calefacción en este caso sin sombreadamiento sería de 100 kW.

Debe considerarse, no obstante, que el sombreadamiento influirá en mayor grado en la demanda de refrigeración, reduciéndola en este caso. Una refrigeración que no se ha estudiado en el presente trabajo.

### 11.1.3. Influencia conjunta de sombreadamiento y puentes térmicos

En total, el efecto conjunto del sombreadamiento y los puentes térmicos en el presente edificio es un aumento de la demanda de calefacción anual de alrededor de un 40.7%. La influencia de considerarlas o no en la simulación es enorme.

**Tabla 30: demanda de calefacción por mes sin modelizar puentes térmicos ni sombreadamientos.**

Mes	Demanda (kWh)
Enero	5657.92

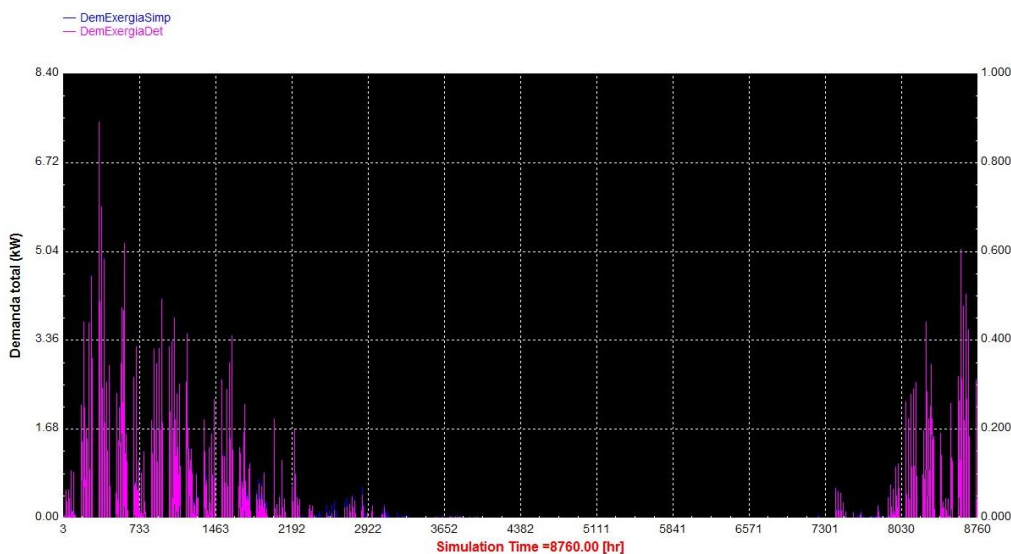
<b>Febrero</b>	4653.68
<b>Marzo</b>	3192.78
<b>Abril</b>	1711.02
<b>Mayo</b>	1034.08
<b>Junio</b>	245.66
<b>Julio</b>	0.05
<b>Agosto</b>	0
<b>Septiembre</b>	0
<b>Octubre</b>	0
<b>Noviembre</b>	221.86
<b>Diciembre</b>	3638.20
<b>TOTAL</b>	<b>20355.26</b>

En este caso la máxima demanda de calefacción estaría en 84 kW.

#### 11.1.4. Demanda de exergía

Con los resultados previamente presentados de demandad energética pueden aplicarse los métodos de análisis exergético, de manera que se obtenga la demanda de calefacción del edificio en términos de exergía.

En el siguiente gráfico se muestra la evolución de las demandas de exergía obtenidas mediante la aplicación de cada método. Se observa que son casi idénticas.



**Gráfico 13: evolución de la demanda de exergía para calefacción del edificio.**

En efecto, la siguiente tabla muestra como con ambos métodos se obtienen resultados muy parecidos. No obstante, mediante el método detallado se obtiene un valor ligeramente inferior, ya que se separa la ventilación en el cálculo detallado y se requiere menor trabajo para incrementar la energía térmica de la materia hasta una temperatura que para suministrar la misma cantidad de energía en forma de calor a esa misma temperatura.

**Tabla 31: demanda de exergía calculada con el método simplificado y con el método detallado.**

	<b>Demanda exergía (kWh)</b>	<b>% de Demanda energía</b>
<b>Método simplificado</b>	995.20	3.47%



<b>Método detallado</b>	961.96	3.36%
-------------------------	--------	-------

## 11.2. Análisis Termoeconómico

### 11.2.1. Horas de funcionamiento

Una vez realizada la simulación de la instalación, pueden contabilizarse las horas del año en las que cada equipo está en funcionamiento. A partir de ese número de horas, pueden calcularse los valores de la amortización de los equipos a considerar tanto en el análisis exergético como en el económico.

La siguiente tabla muestra la amortización exergética resultante de considerar una vida útil de 20 años para cada uno de los equipos (excepto para el circuito de calefacción), tal y como se ha mencionado en un punto anterior.

**Tabla 32: horas de funcionamiento y amortización exergética de cada equipo.**

Amortización a 20 años				
	Coste (kWh <sub>ex</sub> )	kWh <sub>ex</sub> /año	nº horas/año	Z (kW)
<b>Equipo 1</b>	62887	3144.35	4483	0.7014
<b>Equipo 2</b>	62887	3144.35	7	449.19
<b>Equipo 3</b>	6250	312.5	4483	0.0697
<b>Equipo 4</b>	53	2.65	2233	0.0012
<b>Equipo 5</b>	1104	27.6	4097	0.0067
<b>Equipo 6</b>	6250	312.5	4686	0.0667

Se comprueba que, tal como era esperable, la segunda caldera (Equipo 2) está prácticamente todas las horas parada. De esta manera solo entrará en funcionamiento cuando la primera no sea capaz de hacer frente a la demanda, lo que se traduce en solamente 7 horas al año. Este resultado era previsible considerando el valor del pico de demanda de calefacción obtenido en la simulación del edificio y la potencia que tiene cada caldera.

Debido a las pocas horas de funcionamiento de dicha caldera, su amortización (exergética y económica) se dispara, obteniéndose valores varios ordenes de magnitud mayores que en el resto de los equipos.

**Tabla 33: horas de funcionamiento y amortización económica de cada equipo.**

Amortización a 20 años				
	Coste (€)	€/año	nº horas/año	Z (€/h)
<b>Equipo 1</b>	16000	800	4483	0.1785
<b>Equipo 2</b>	16000	800	7	114.29
<b>Equipo 3</b>	7500	375	4483	0.0836
<b>Equipo 4</b>	21000	525	2233	0.2351
<b>Equipo 5</b>	4000	200	4097	0.0488
<b>Equipo 6</b>	5500	275	4686	0.0587

La consecuencia de lo mencionado será que los costes del producto de esta segunda caldera serán muy altos, pero no tendrán prácticamente influencia en los costes medios anuales del resto de flujos porque esto ocurrirá solamente en 7 de las 8758 horas de simulación.

### 11.2.2. Consumo

Para hacer frente a la demanda, a lo largo de las horas de funcionamiento mostradas previamente los equipos de la instalación consumirán una cantidad de gas natural y electricidad que se resume en la siguiente tabla.

Tabla 34: distribución del consumo y coste de gas natural y electricidad de la instalación.

		kWh/año	€/año
GN	Caldera 1	52792.84	2344.00
	Caldera 2	60.30	2.68
	<b>TOTAL Gas Natural:</b>	<b>52853.15</b>	<b>2346.68</b>
Elec.	Bomba Caldera 1	126.37	15.80
	Bomba Caldera 2	0.07	0.01
	Bomba Impulsión Calefacción	449.13	56.14
	Bomba Intercambiador	92.94	11.62
	Bomba Depósito ACS	92.94	11.62
	<b>TOTAL Electricidad:</b>	<b>761.45</b>	<b>95.18</b>

Se observa que el consumo energético y, por lo tanto, coste económico más importante corresponde al gas natural. Debido a que tal y como se ha mencionado anteriormente la caldera número 2 prácticamente no entrará en funcionamiento, la gran mayoría de este consumo de gas corresponderá a la primera caldera.

Respecto a la electricidad, el mayor consume corresponde a la bomba de impulsión del circuito de calefacción, debido a que la altura manométrica que proporciona dicha bomba al agua es significativamente superior a las demás bombas y a que el circuito de calefacción funcionará un gran número de horas al año (2233 horas).

### 11.2.3. Rendimientos

Si se analizan los rendimientos energéticos de cada equipo, siempre teniendo en consideración las definiciones de fuel y producto presentadas en un punto anterior, se comprueba que los rendimientos medios son altos.

El rendimiento máximo que muestra la segunda caldera es menor que en el caso de la primera, debido a que cada vez que esta segunda caldera entra en funcionamiento existe demanda de calor del depósito de ACS y el salto térmico de consigna en caldera es de 80/60 °C, con el que el rendimiento es menor que en el caso de que exista solo demanda de calefacción y sea de 45/35°C.

Tabla 35: rendimiento energético máximo, mínimo y medio obtenido en cada equipo.

	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Equipo 4	Equipo 5	Equipo 6
<b>Max</b>	98%	92%	100%	100%	100%	100%
<b>Min</b>	91%	91%	92%	6%	28%	76%
<b>Medio</b>	95%	92%	98%	92%	99%	96%

Sin embargo, si nos fijamos en el rendimiento exergético los valores que se obtienen son significativamente menores. Esto se debe a las irreversibilidades que tienen lugar en cada uno de los equipos, lo que provoca una destrucción de exergía.

Tabla 36: rendimiento exergético máximo, mínimo y medio obtenido en cada equipo.

	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Equipo 4	Equipo 5	Equipo 6
<b>Max</b>	21%	17%	100%	89%	93%	95%
<b>Min</b>	4%	14%	32%	0%	5%	50%
<b>Medio</b>	15%	16%	83%	65%	89%	72%

Analizando la exergía total destruida a lo largo de un año, el desglose que se obtiene se muestra en el siguiente gráfico. En este caso, se incluyen, dentro de la exergía destruida, tanto la propiamente destruida como las pérdidas exergéticas de cada equipo.

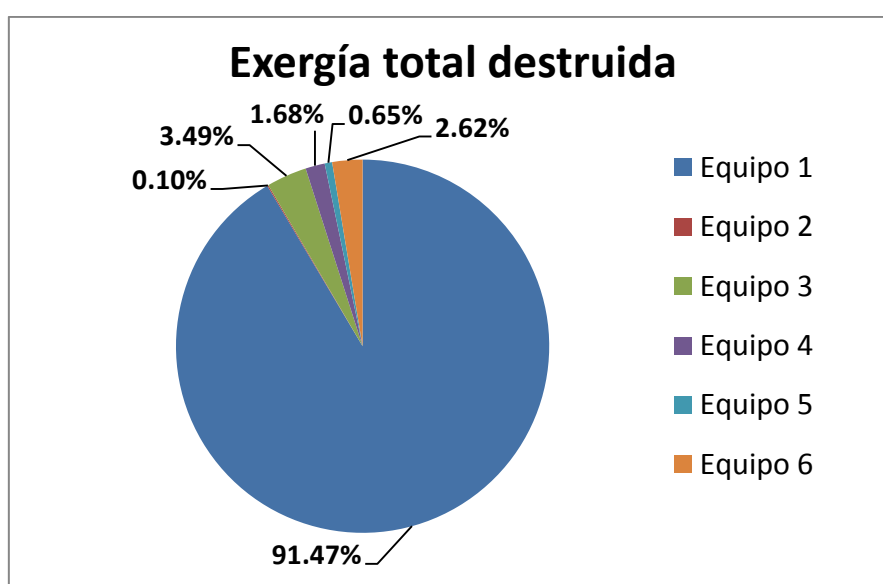


Gráfico 14: desglose de la exergía destruida total por equipos.

El equipo responsable de la mayor parte de la exergía destruida es, con diferencia, el Equipo 1. Se trata de un equipo (la caldera) en el que los procesos que tienen lugar poseen una gran cantidad de irreversibilidades y que, además, le corresponden un número alto de horas de funcionamiento a lo largo del año. Se observa que el resultado es coherente con el bajo rendimiento exergético medio que muestra el Equipo 1.

La destrucción que tiene lugar en el resto de equipos es un orden de magnitud menor. Los equipos que siguen al Equipo 1 en destrucción de exergía son el Equipo 3, el Equipo 6 y el Equipo 4, por ese orden. Debe considerarse que a los dos primeros les corresponden un mayor número de horas de funcionamiento a lo largo de año que al Equipo 4, que es el que, tras las calderas, menor rendimiento exergético muestra.

#### 11.2.4. Costes unitarios

Tras la aplicación de las proposiciones de la Termoeconomía, se obtienen los costes exergéticos unitarios medios de cada flujo, los cuales se muestran en la siguiente tabla. Se comprueba que cuanto más alejado está un flujo del punto de generación, y por lo tanto más procesos e irreversibilidades ha sufrido, mayor es su coste unitario.

Tabla 37: costes exergéticos unitarios medios de los flujos analizados.

Costes exergéticos unitarios medios ( $kWh_{ex}/kWh_{ex}$ )			
$k^*_1$	7.897	$k^*_{12}$	1092.051
$k^*_2$	1092.051	$k^*_{13}$	1.000
$k^*_3$	9.251	$k^*_{14}$	1.000
$k^*_4$	9.251	$k^*_{15}$	1.000
$k^*_5$	8.876	$k^*_{16}$	1.000
$k^*_6$	8.876	$k^*_{17}$	1.000
$k^*_7$	9.418	$k^*_{18}$	1.000
$k^*_8$	9.418	$k^*_{19}$	1.000
$k^*_9$	0.000	$k^*_{20}$	12.541
$k^*_{10}$	10.392	$k^*_{21}$	5.177
$k^*_{11}$	7.897		

Considerando las definiciones de fuel y producto, y a partir de la tabla anterior, puede obtenerse el coste exergético unitario medio correspondiente a los productos de cada equipo. De esta manera se observa más claramente lo mencionado previamente: el coste exergético unitario crece a medida que nos alejamos del punto de generación.

Tabla 38: costes exergéticos unitarios medios de los productos de los equipos considerados.

$kWh_{ex}/kWh_{ex}$						
Caldera 1	Caldera 2	Colector a calefacción	Calefacción	Colector a ACS	Intercambiador	ACS
7.897	1092.051	9.251	12.541	8.876	9.418	10.392

Se realizan los mismos cálculos, realizando el análisis en este caso en términos económicos. La siguiente tabla muestra los costes económicos unitarios medios de cada flujo de la instalación.

Tabla 39: costes económicos unitarios medios de los flujos analizados.

Costes unitarios medios ( $€/kWh_{ex}$ )			
$c^*_1$	0.515	$c^*_{12}$	276.501
$c^*_2$	276.501	$c^*_{13}$	0.044
$c^*_3$	0.560	$c^*_{14}$	0.125
$c^*_4$	0.560	$c^*_{15}$	0.044
$c^*_5$	0.678	$c^*_{16}$	0.125
$c^*_6$	0.678	$c^*_{17}$	0.125
$c^*_7$	0.817	$c^*_{18}$	0.125
$c^*_8$	0.817	$c^*_{19}$	0.125
$c^*_9$	0.000	$c^*_{20}$	5.779
$c^*_{10}$	0.876	$c^*_{21}$	0.451
$c^*_{11}$	0.515		

Considerando de nuevo las definiciones de fuel y producto, y a partir de la tabla anterior, puede obtenerse el coste económico unitario medio correspondiente a los productos de cada equipo.

Tabla 40: costes económicos unitarios medios de los productos de los equipos considerados.

€/kWh <sub>ex</sub>						
Caldera 1	Caldera 2	Colector a calefacción	Calefacción	Colector a ACS	Intercambiador	ACS
0.515	276.501	0.560	5.779	0.678	0.817	0.876

Se observa que el coste económico crece significativamente en el último proceso correspondiente a la calefacción. Esto se debe a que en este Equipo 4 la amortización económica tendrá una importancia mayor que en el resto de equipos, ya que a pesar de que su vida útil se considere más larga que en el resto de equipos, el coste económico del equipo es grande y las horas de funcionamiento anuales no son tantas como en otros equipos.

Se han presentado valores medios, pero a lo largo del año los costes unitarios sufren variaciones importantes. A modo ilustrativo, el siguiente gráfico muestra la variación horaria del coste económico unitario del producto de la primera caldera.

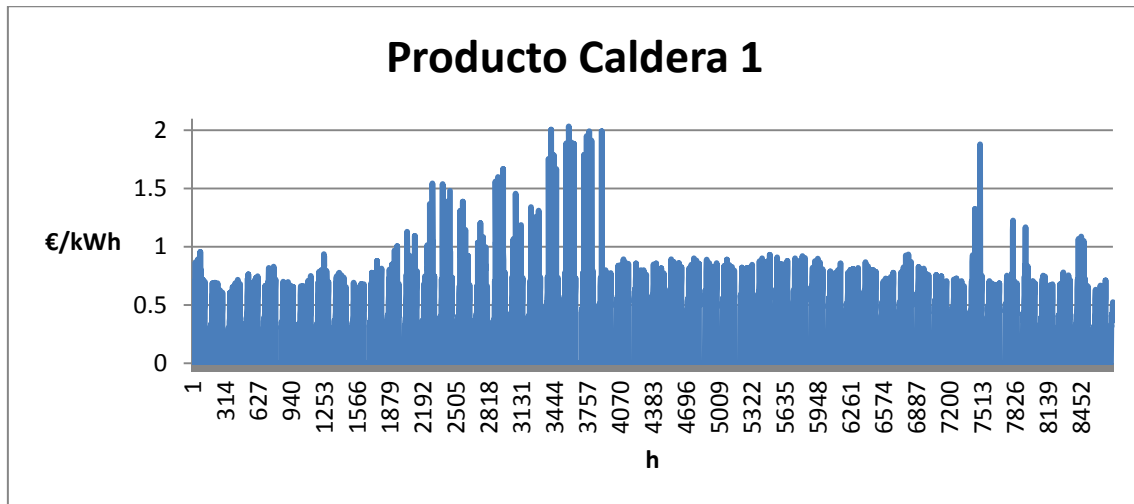


Gráfico 15: evolución del coste exergético unitario del producto de la caldera 1.

### 11.2.5. El coste de la energía

Una vez realizada la distribución de costes económicos, para lo que es necesario llevarla a cabo en términos exergéticos, puede realizarse una conversión y calcularse los costes exergéticos y económicos, pero en este caso de cada unidad de energía, no exergía, de un flujo. Esto puede ser útil a la hora de presentar resultados a personas que no estén familiarizadas con el término “exergía”.

De esta manera, puede obtenerse la evolución del coste de la energía (tanto en términos exergéticos como económicos) a medida que dicha energía sufre diversos procesos. Debido a las irreversibilidades que tienen lugar en ellos, el coste de la unidad de energía va en aumento.

Para el análisis de esta evolución de costes, y al tener dos productos finales diferentes de la instalación (calefacción y ACS), se han diferenciado los procesos que tienen lugar hasta obtener ambos productos. De esta manera, la siguiente tabla muestra la evolución de los costes de la energía, tanto para la calefacción (en las columnas de la izquierda) como para el ACS (columnas de la derecha).

Tabla 41: evolución del coste exergético de la energía.

	$kWh_{ex} / kWh_{energ}$		$kWh_{ex} / kWh_{energ}$
<b>Gas y electricidad</b>	0.421	<b>Gas y electricidad</b>	0.823
<b>Generación</b>	1.200	<b>Generación</b>	1.238
<b>Impulsión</b>	1.244	<b>Impulsión</b>	1.287
<b>Calefacción</b>	1.536	<b>Intercambiador</b>	1.302
		<b>ACS</b>	1.575

De manera gráfica, la evolución del coste exergético de la energía para hacer frente a la demanda de calefacción es la siguiente.

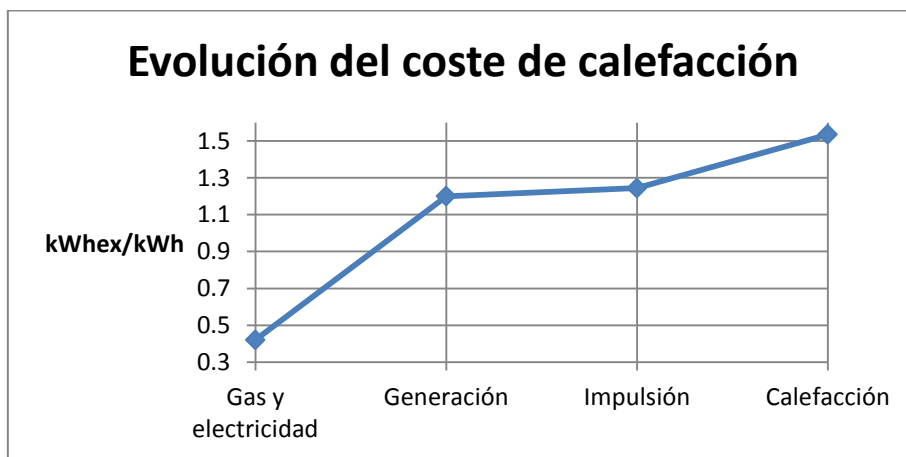


Gráfico 16: evolución del coste exergético de la energía para calefacción.

Se observa que el coste va en aumento a medida que la energía sufre procesos termodinámicos. Se comprueba que es en los equipos con menor rendimiento exergético y mayor destrucción de exergía donde el aumento en el coste de la energía será mayor.

Análogamente, la evolución del coste exergético de la energía hasta la obtención del ACS se muestra en el siguiente gráfico.

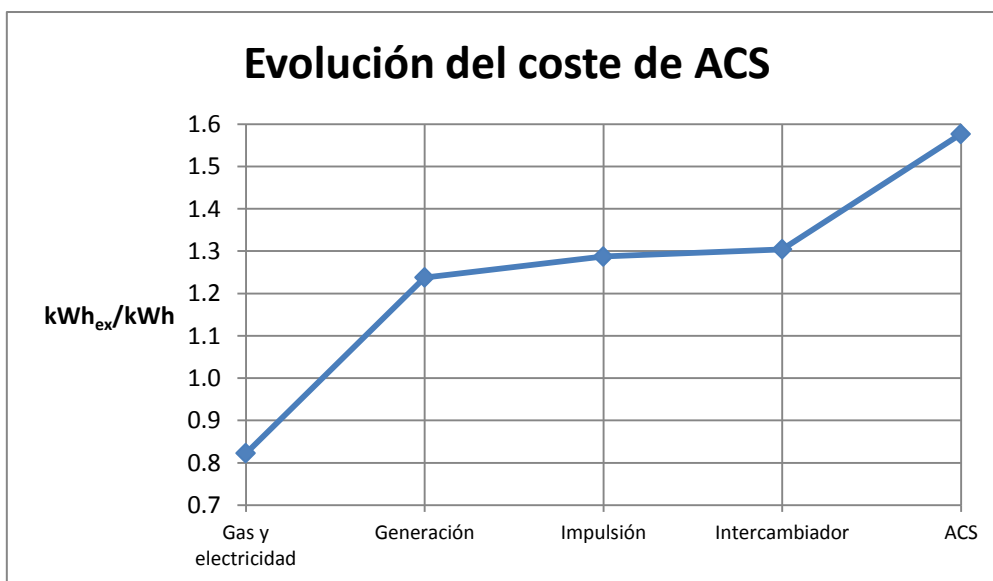


Gráfico 17: evolución del coste exergético de la energía para producción de ACS.

Se realizan los mismos cálculos en términos económicos, de manera que pueda obtenerse la evolución del coste económico en función de los procesos que sufre la energía.

Tabla 42: evolución del coste económico de la energía.

	€/kWh <sub>energ</sub>		€/kWh <sub>energ</sub>
<b>Gas y electricidad</b>	0.023	<b>Gas y electricidad</b>	0.039
<b>Generación</b>	0.066	<b>Generación</b>	0.083
<b>Impulsión</b>	0.076	<b>Impulsión</b>	0.101
<b>Calefacción</b>	0.695	<b>Intercambiador</b>	0.117
		<b>ACS</b>	0.131

Se observa cómo, al igual que en el caso del coste de la exergía, en el último proceso de la calefacción la energía también sufre un aumento considerable del coste económico. Debe reiterarse que esto se debe a la mayor influencia que la amortización económica tiene en el Equipo 6.

La evolución de los costes mostrada por la tabla anterior se observa gráficamente en los siguientes dos gráficos.

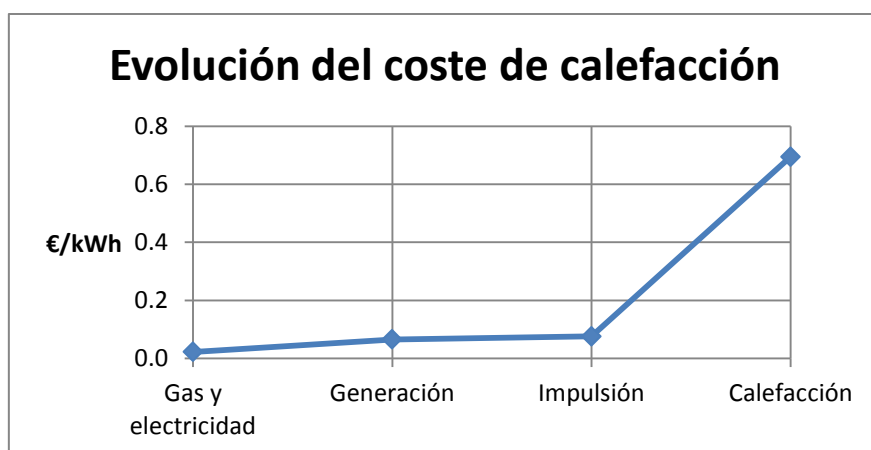


Gráfico 18: evolución del coste económico de la energía calefacción.

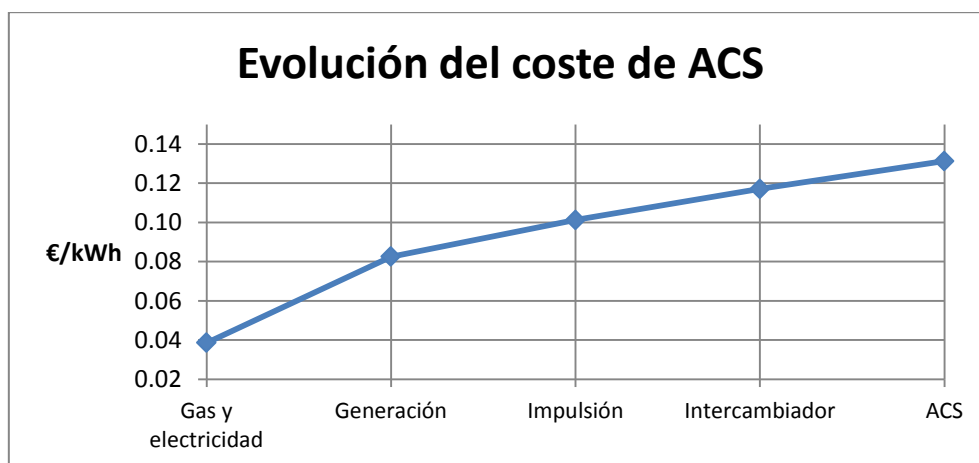


Gráfico 19: evolución del coste económico de la energía para producción de ACS.

## 12. Conclusiones

La modelización de un edificio en un software de simulación transitoria permite obtener la evolución anual de la demanda de calefacción de dicho edificio. De esta manera, es posible comparar la influencia que diferentes factores pueden tener en dicha demanda.

En el edificio analizado se comprueba que, debido a sus singularidades constructivas, la influencia de los puentes térmicos y el sombreado de sus ventanas son significativamente mayores que en la mayoría de los casos.

Al tratarse de un edificio de reciente construcción, con cerramientos pesados y muy bien aislados, y teniendo un gran número de ellos bajo rasante y en contacto con el terreno, la demanda de calefacción no es muy grande y la influencia de los puentes térmicos en ella es muy significativa. A su vez, debido al gran área de ventanas y cristaleras que posee, la influencia de las ganancias solares es importante, y por lo tanto la de los sombreados de dichos huecos también.

En cuanto a la demanda de exergía, se comprueba que es solamente una pequeña fracción de la demanda de energía. Esto significa que la calidad de la energía que el edificio necesita para satisfacer su demanda de calefacción es pequeña, por lo que la manera más eficiente de hacer frente a esa demanda sería utilizar fuentes de energía de poca calidad.

Aplicando el método simplificado y el método detallado para el cálculo de la demanda de exergía, se obtienen resultados muy similares, siendo el último método el que proporciona valores ligeramente menores al considerar la ventilación de manera independiente.

A partir de la obtención previa de la evolución de la demanda de calefacción del edificio, ha sido posible simular el funcionamiento que tendría su instalación para satisfacer tanto dicha demanda como la demanda de ACS a lo largo de un año. La aplicación de la Termoeconomía al análisis de sistemas energéticos proporciona una imprescindible base teórica para el cálculo y distribución de costes exergéticos y económicos.

Ello ha permitido el cálculo del rendimiento exergético de cada equipo, que resulta significativamente menor que el rendimiento energético. Ello se debe a las irreversibilidades que existen en cada proceso termodinámico real que sufre la energía, lo que provoca una degradación de la calidad de la misma.

De esta manera, ha sido posible realizar una comparativa entre la exergía destruida por cada uno de los equipos a lo largo del año, de manera que se identifican los procesos responsables de un mayor incremento del coste final, tanto exergético como económico, de la energía.

Estando las irreversibilidades de un proceso necesariamente ligadas al coste del producto de dicho proceso, se comprueba que en el caso de la calefacción los equipos responsables de la mayor parte de su coste, por diferentes razones, son la caldera y el equipo terminal del circuito. En el primero de ellos es donde se destruye la mayor parte de la exergía, obteniéndose rendimientos exergéticos muy pobres. En el segundo equipo, sin embargo, y a pesar de que su rendimiento exergético tampoco es bueno, la contribución al aumento del coste de la energía se debe al gran coste de inversión requerido por dicho equipo al ser un circuito de suelo radiante.



Como se ha comentado, el buen aislamiento del edificio provoca que el número de horas donde existe demanda de calefacción no sea tan alto, lo que provoca que la amortización del equipo a considerar en la aplicación de la Termoeconomía se incremente.

En el caso del ACS, es en la caldera y en el depósito donde se localizan los factores más importantes del coste final del ACS.

Si bien el colector es responsable de una cantidad importante de destrucción de exergía al cabo del año, esto se debe a que el número de horas en los que está en funcionamiento es también mayor al de otros equipos. Además, el incremento del coste de la energía debido a las irreversibilidades que tienen lugar en él se distribuye entre el ACS y la calefacción, ya que durante un buen número de horas al año alimenta a ambos simultáneamente.

En resumen, se trata de un edificio con una baja demanda de calefacción, pero dicha demanda se satisface mediante una instalación convencional, existiendo actualmente tecnologías más eficientes desde el punto de vista exergético.

### 13. Referencias

- [1] SHUKUYA, Masanori. Exergy Concept and its Application to the Building Environment. *Building and Environment*, 7, 2009, vol. 44, no. 7. pp. 1545-1550.
- [2] ALA-JUUSELA, Mia. *Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort: Guidebook to IEA ECBCS Annex 37. Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings*. VTT, 2003.
- [3] MEGGERS, Forrest, et al. Low Exergy Systems Implementation. *Energy*, 5, 2012, vol. 41, no. 1, pp. 48-55.
- [4] HEPBASLI, Arif. Low Exergy (LowEx) Heating and Cooling Systems for Sustainable Buildings and Societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1, 2012, vol. 16, no. 1. pp. 73-104.
- [5] HEPBASLI, Arif. A Key Review on Exergetic Analysis and Assessment of Renewable Energy Resources for a Sustainable Future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 2008, vol. 12, no. 3. pp. 593-661.
- [6] TORIO, H.; and SCHMIDT, D. Low exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Annex 49 Final Report, 2011.
- [7] WEPFER, W.J. et al. *Thermodynamic Analysis of Chemically Reactive Systems*, ASME, 1988.
- [8] QUEROL, E.; GONZALEZ-REGUERAL, B.; and PEREZ-BENEDITO, JL. *Practical Approach to Exergy and Thermo-economic Analyses of Industrial Processes*, Springer-Verlag London, 2013.
- [9] SCHMIDT, Dietrich; and ALA-JUUSELA, Mia. *Low exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings*, 2004.
- [10] ANGELOTTI, A; and CAPUTO, P. The Exergy Approach for the Evaluation of Heating and Cooling Technologies; First Results Comparing Steady-State and Dynamic Simulations, *Proc. of the 2<sup>nd</sup> PALENC Conference, Crete Island, Greece*, vol. I, pp. 59–64, 2007.
- [11] SAKULPIPATSIN, Poppong, et al. *Exergy Efficient Building Design*. VSSD, 2008.
- [12] ERLACH, Berit; SERRA, Luis; and VALERO, Antonio. Structural Theory as Standard for Thermo-economics. *Energy Conversion and Management*, 0, 1999, vol. 40, no. 15-16, pp. 1627-1649.
- [13] VALERO, A; SERRA, L.; and LOZANO, MA. Structural Theory of Thermo-economics. *ASME, New York, NY, USA*, vol. 30. pp. 189-198, 1993.
- [14] Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermo-economics. Part I: Theory. *Journal of Energy Resources Technology*, 2006, vol. 128, no. 1, pp. 1-8.
- [15] LOZANO, MA; and VALERO, A. Theory of Exergetic Cost. *Energy*, vol. 18, no. 9 pp 939-960, 1993.
- [16] VALERO, A.; LOZANO M.A.; and MUÑOZ, M. A General Theory of Exergy Saving. I: On the exergetic cost. *Computer – Aided Engineering of Energy Systems*, AES, vol 2-3, pp. 1-8, New York: ASME, 1986.

[17] SCHMIDT, Dietrich. Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. *Energy and Buildings*, 2009, vol. 41, no. 3. pp. 331-336.

[18] *Documento Básico HE Ahorro de Energía*, CTE, 2013.

[19] *TRNSYS. Volume 6. Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.

[20] *Condiciones de Aceptación de Procedimientos Alternativos a LIDER y CALENER*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2009.

[21] *Guía Técnica. Condiciones Climáticas Exteriores de Proyecto*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2010.

[22] *Documento Básico SI Seguridad en caso de incendio*, CTE, 2010.

[23] *Guía Básica. Calderas de condensación*. Campaña Madrid Ahorra Energía. Comunidad de Madrid.

# Anexo I: planos acotados

SUPERFICIES • PLANTA SOTANO		
AREA DE SERVIDORES		
1	DISTRIBUIDOR	20.80 m <sup>2</sup>
2	INSTALACIONES Y CALERAS	42.78 m <sup>2</sup>
3	VESTIBULO CALERAS	2.47 m <sup>2</sup>
4	ALMACEN GENERAL	23.88 m <sup>2</sup>
5	ALMACEN DE RESIDUOS	2.82 m <sup>2</sup>
6	CUARTO ELECTRICO	2.82 m <sup>2</sup>
7	RACK	4.88 m <sup>2</sup>
8	INSTALACIONES Y VENTILACION	46.79 m <sup>2</sup>
9	ARCHIVO HISTORIAS	50.19 m <sup>2</sup>
AREA DE PERSONAL		
10	VESTUARIO HOMBRES	13.25 m <sup>2</sup>
11	VESTIBULO VESTUARIO HOMBRES	3.15 m <sup>2</sup>
12	ASEO HOMBRES	1.78 m <sup>2</sup>
13	DUCHA HOMBRES	4.59 m <sup>2</sup>
14	VESTUARIO MUJERES	23.87 m <sup>2</sup>
15	VESTIBULO VESTUARIO MUJERES	4.41 m <sup>2</sup>
16	ASEO MUJERES 1	1.45 m <sup>2</sup>
17	ASEO MUJERES 2	1.45 m <sup>2</sup>
18	DUCHA MUJERES	4.89 m <sup>2</sup>
SUP. UTIL. TOTAL		255.25 m <sup>2</sup>

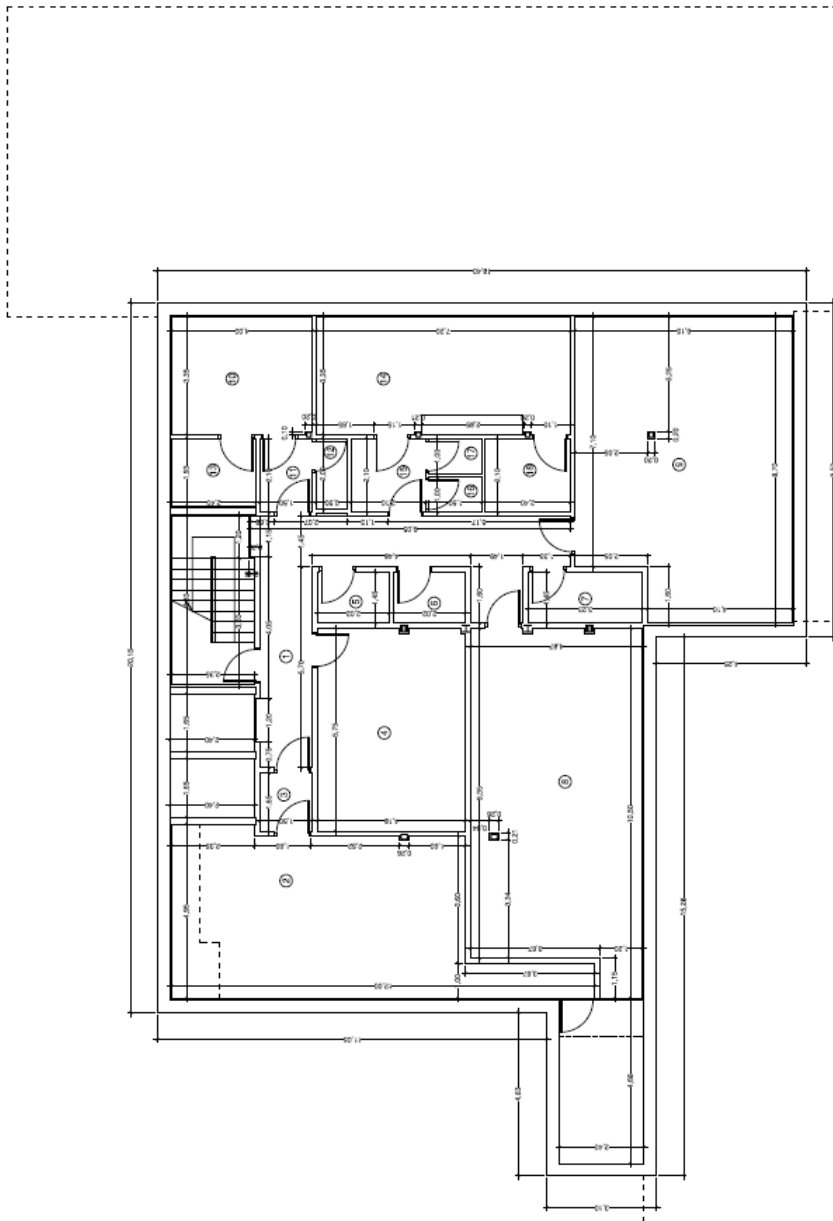


Ilustración I.1: plano acotado del sótano

SUPERFICIES - PLANTA BAJA		
ACCESO, RECEPCIÓN		
1	FRONT OFFICE	37,76 m <sup>2</sup>
2	BACK OFFICE	37,64 m <sup>2</sup>
3	VESTIBULO ATENCIÓN	10,10 m <sup>2</sup>
4	DESPACHO ATENCIÓN PERSONALIZADA	9,13 m <sup>2</sup>
5	ARCHIVO-METODIAS	29,56 m <sup>2</sup>
6	ALMACÉN	13,12 m <sup>2</sup>
7	ASEOS HOMBRAS	9,81 m <sup>2</sup>
8	ASEOS MUJERES	11,20 m <sup>2</sup>
9	ASEO ACCESIBLE	4,95 m <sup>2</sup>
10	BETUMBAJÓN ASEOS	3,75 m <sup>2</sup>
11	CUARTO LIMPIEZA	5,90 m <sup>2</sup>
12	CANCHA ACCESO	11,41 m <sup>2</sup>
13	ACCESO - ESPINA	67,01 m <sup>2</sup>
14	BETUMBAJÓN	91,65 m <sup>2</sup>
ATENCIÓN PRIMARIA		
15	ACCESO - ESPINA	48,81 m <sup>2</sup>
16	SALA DE EXAMENES	35,21 m <sup>2</sup>
17	SALA DE CURAS Y PRUEBAS	25,08 m <sup>2</sup>
18	SALA DE URGENCIAS	14,54 m <sup>2</sup>
19	CONSULTA PREVENTIVA	14,50 m <sup>2</sup>
20	CONSULTA ENFERMERIA GENERAL PA 1	14,00 m <sup>2</sup>
21	CONSULTA ENFERMERIA GENERAL PA 2	14,00 m <sup>2</sup>
22	ARCHIVO ATENCIÓN	8,42 m <sup>2</sup>
23	ESPINA ESPINA	19,76 m <sup>2</sup>
24	ACCESO - ESPINA	23,74 m <sup>2</sup>
25	SALA DE UR	28,48 m <sup>2</sup>
26	VESTIBULO	2,60 m <sup>2</sup>
27	VESTIBULO 2	7,66 m <sup>2</sup>
28	SALA DE CONTROL E INFORMES	24,50 m <sup>2</sup>
29	ASEO	3,27 m <sup>2</sup>
SUP. TOTAL TOTAL		692,06 m <sup>2</sup>

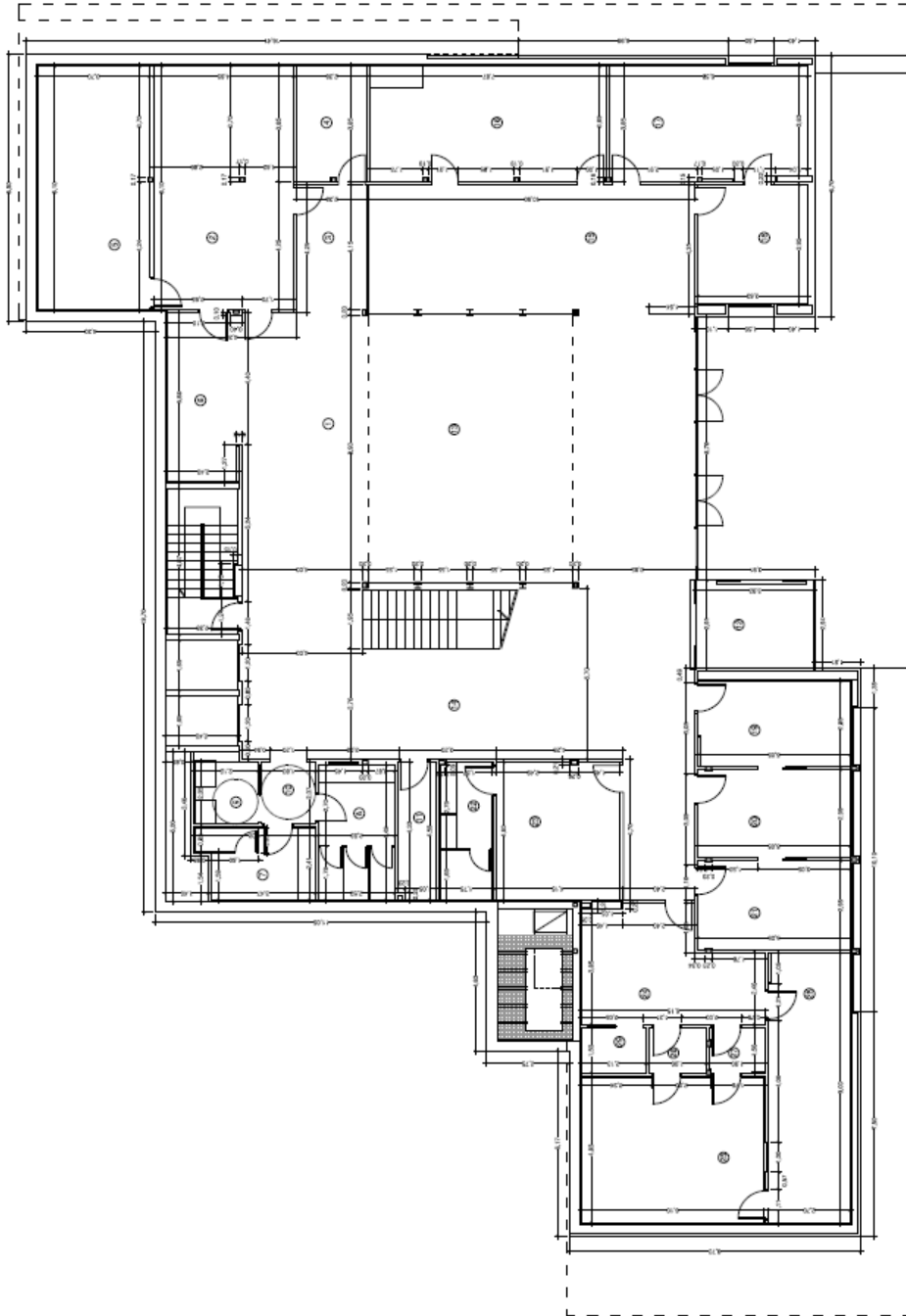
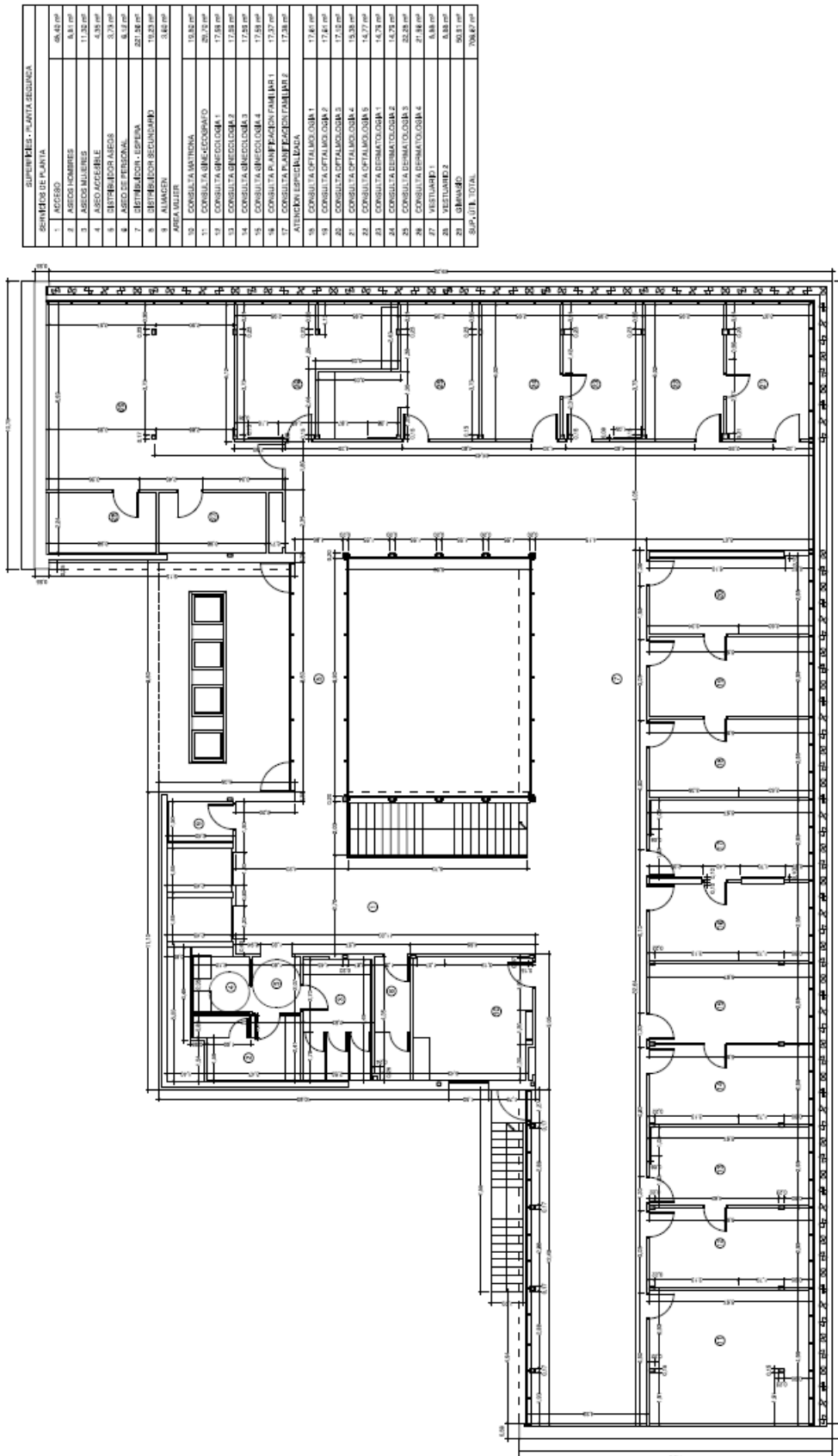


Ilustración I.1: plano acotado de la planta baja





SUPERFICIE - PLANTA SEGUNDA		
SERVICIOS DE PLANTA		
1	ACCESO	66,42 m <sup>2</sup>
2	ASEOS HOMBRAS	6,81 m <sup>2</sup>
3	ASEOS MUJERES	11,32 m <sup>2</sup>
4	ASEO ACCESIBLE	4,28 m <sup>2</sup>
5	RETRIBUIDOR ASEOS	3,78 m <sup>2</sup>
6	ASEO DE PERSONAL	6,12 m <sup>2</sup>
7	RETRIBUIDOR ESPERA	287,38 m <sup>2</sup>
8	RETRIBUIDOR SEGURIDAD	16,23 m <sup>2</sup>
9	ALMACEN	3,65 m <sup>2</sup>
AREA VALTER		
10	CONSULTA MATICINA	16,82 m <sup>2</sup>
11	CONSULTA QUIMICOBIOPATO	26,72 m <sup>2</sup>
12	CONSULTA QUIMICOLOGIA 1	17,56 m <sup>2</sup>
13	CONSULTA QUIMICOLOGIA 2	17,28 m <sup>2</sup>
14	CONSULTA QUIMICOLOGIA 3	17,28 m <sup>2</sup>
15	CONSULTA QUIMICOLOGIA 4	17,56 m <sup>2</sup>
16	CONSULTA PLANTACION FAMILIAR 1	17,27 m <sup>2</sup>
17	CONSULTA PLANTACION FAMILIAR 2	17,28 m <sup>2</sup>
ATENCION ESPECIALIZADA		
18	CONSULTA OFTALMOLOGIA 1	17,84 m <sup>2</sup>
19	CONSULTA OFTALMOLOGIA 2	17,84 m <sup>2</sup>
20	CONSULTA OFTALMOLOGIA 3	17,52 m <sup>2</sup>
21	CONSULTA OFTALMOLOGIA 4	15,26 m <sup>2</sup>
22	CONSULTA OFTALMOLOGIA 5	14,77 m <sup>2</sup>
23	CONSULTA DERMATOLOGIA 1	14,79 m <sup>2</sup>
24	CONSULTA DERMATOLOGIA 2	22,29 m <sup>2</sup>
25	CONSULTA DERMATOLOGIA 3	22,29 m <sup>2</sup>
26	CONSULTA DERMATOLOGIA 4	27,88 m <sup>2</sup>
27	VESTIBULO 1	8,88 m <sup>2</sup>
28	VESTIBULO 2	8,88 m <sup>2</sup>
29	GRABADO	50,31 m <sup>2</sup>
SUP. UT. TOTAL		706,67 m <sup>2</sup>

Ilustración I.4: plano acotado de la segunda planta

## Anexo II: composición de cerramientos

Tabla II.1: composición y espesor de cada cerramiento definido en TRNSYS.

Cerramiento	U (W/m <sup>2</sup> K)	Material	Espesor (m)		
<b>Basalto</b>	0.49	Basalto [2700<d<300]	0.02		
		Cámara de aire 2 cm			
		MW Lana Mineral [0.04 W/mK]	0.05		
		Mortero de cemento o cal	0.015		
		BIAcustico 140	0.14		
		Mortero de áridos ligeros [vermiculita perlita]	0.015		
		<b>Zinc</b>	0.47	Zinc	0.005
		Cámara de aire 1 cm			
		MW Lana Mineral [0.04 W/mK]	0.05		
		Mortero de cemento o cal	0.015		
		BIAcustico 140	0.14		
		Mortero de áridos ligeros [vermiculita perlita]	0.015		
		<b>Curvo</b>	0.58	Mortero de cemento o cal	0.05
				Hormigón armado [d>2500]	0.25
MW Lana Mineral [0.04 W/mK]	0.05				
Polietileno alta densidad [HDPE]	0.005				
Cámara de aire 5 cm					
Placa de yeso laminado	0.015				
<b>Muro</b>	0.83			Caliza blanda [1600<d<1790]	0.5
				Arena y grava [1700<d<2200]	0.5
		Betún fieltro o lámina	0.01		
		Hormigón armado [d>2500]	0.35		
		Cámara de aire 2 cm			
		Placa de yeso laminado	0.015		
		<b>Losa inclinada</b>	0.37	Poliuretano	0.005
				Betún fieltro o lámina	0.01
XPS Expandido con dióxido de carbono	0.08				
Polietileno alta densidad [HDPE]	0.005				
Hormigón armado [d>2500]	0.25				
Cámara de aire 10 cm					
Placa de yeso laminado	0.015				
<b>Plana</b>	0.53			Arena y grava [1700<d<2200]	0.05
		XPS Expandido con dióxido de carbono	0.05		
		Betún fieltro o lámina	0.01		
		Hormigón armado [d>2500]	0.25		
		Cámara de aire 10 cm			
		Placa de yeso laminado	0.015		
		<b>Forjado</b>	0.77	Gres calcáceo [2000<d<2700]	0.02
				Mortero de cemento o cal	0.04
EPS Poliestireno Expendido [0.037 W/mK]	0.03				
Hormigón armado [d>2500]	0.25				
Cámara de aire 10 cm					
Placa de yeso laminado	0.015				
<b>Tabique pladur</b>	0.5			Placa de yeso laminado	0.015



		MW Lana Mineral [0.04 W/mK]	0.07
		Placa de yeso laminado	0.015
<b>Solera</b>	0.61	Plaqueta o baldosa de gres	0.02
		Mortero de cemento o cal	0.02
		EPS Poliestireno Expendido [0.037 W/mK]	0.04
		Hormigón armado [d>2500]	0.25
		Cámara de aire 10 cm	
		Caliza dureza media [1800<d<1990]	0.1

### Anexo III: ventanas del edificio

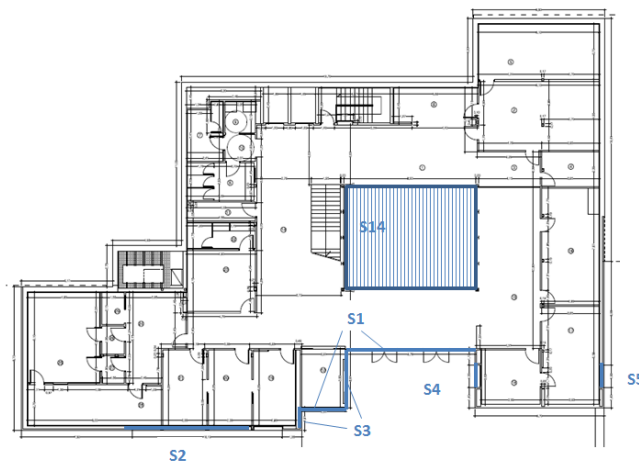


Ilustración III.1: ventanas definidas en la planta baja y número de sombreado correspondiente a cada una.

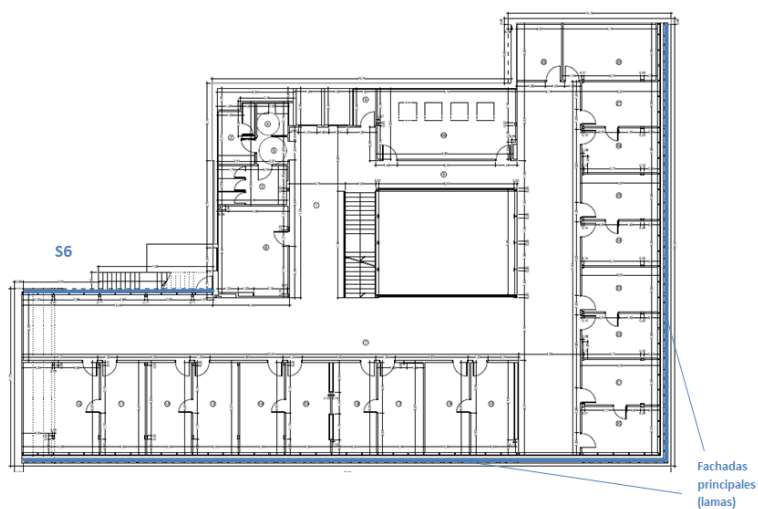


Ilustración III.2: ventanas definidas en la primera planta con su número de sombreado correspondiente.

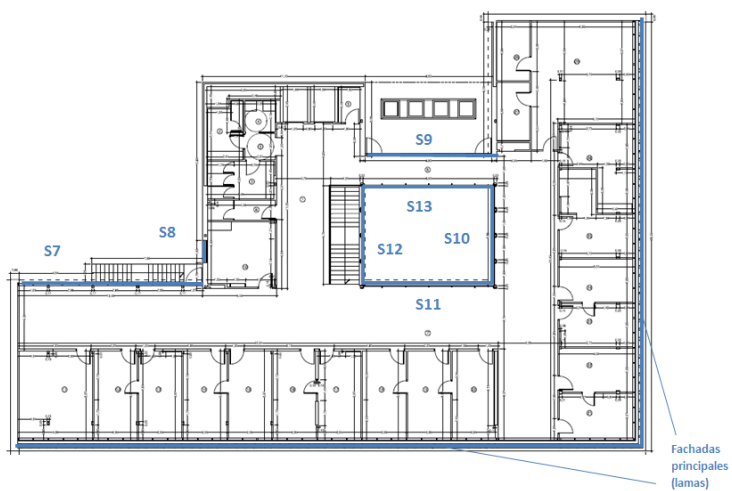


Ilustración III.3: ventanas definidas en la segunda planta con su número de sombreado correspondiente.

## Anexo IV: puentes térmicos

Las siguientes ilustraciones muestran los puentes térmicos de cada zona térmica sobre plano acotado.

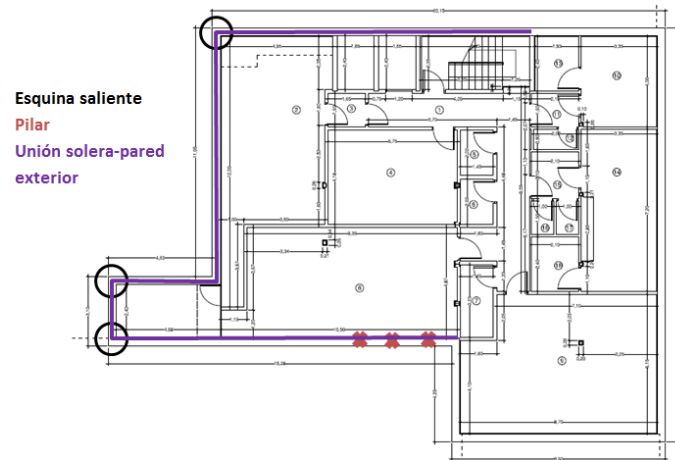


Ilustración IV.1: puentes térmicos del sótano no calefactado.

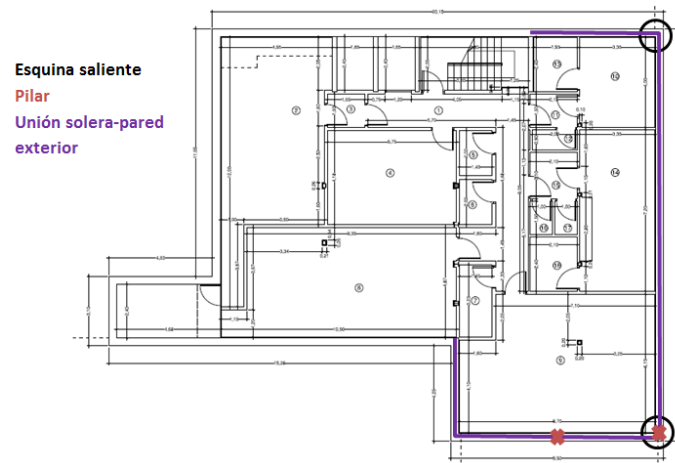


Ilustración IV.2: puentes térmicos del sótano calefactado.

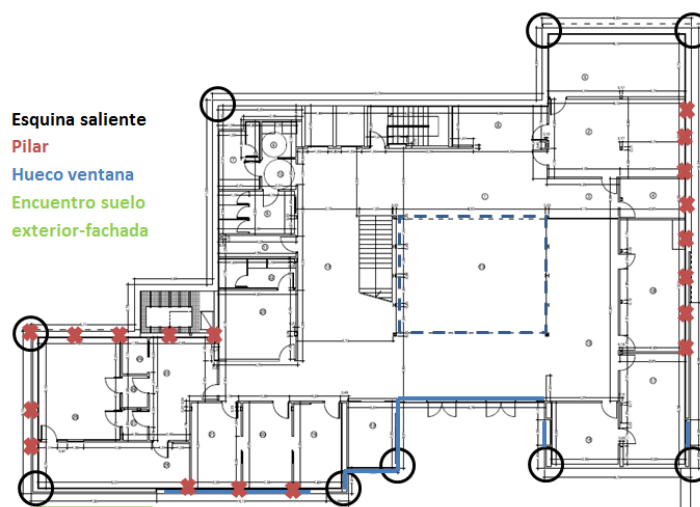
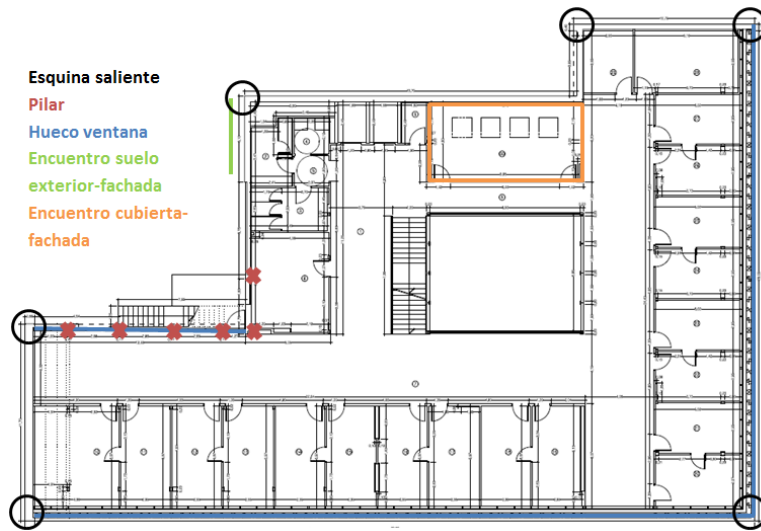
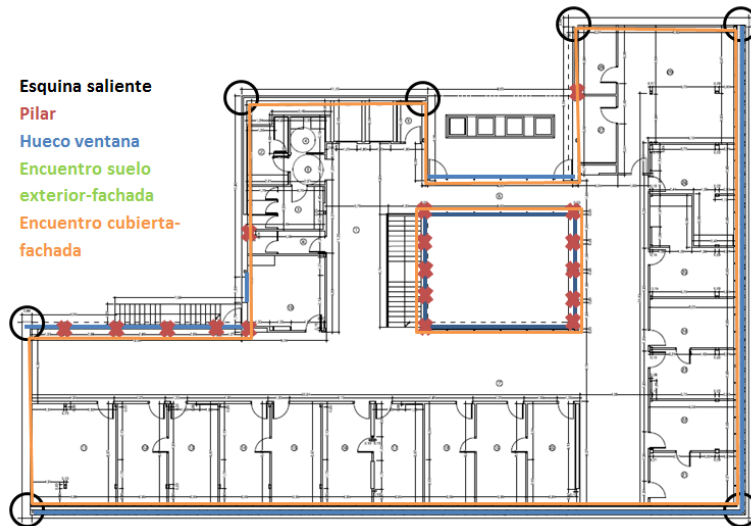


Ilustración IV.3: puentes térmicos de la planta baja.



**Ilustración IV.4: puentes térmicos de la primera planta.**



**Ilustración IV.5: puentes térmicos de la segunda planta.**