



# ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, TÉRMICA Y DE FLUIDOS

## TRABAJO FIN DE GRADO

### **EVALUACIÓN DE LA DESCARBONIZACIÓN DE LA CALEFACCIÓN EN EL SECTOR RESIDENCIAL EN ESPAÑA A TRAVÉS DE LA SUSTITUCIÓN DE CALDERAS DE GAS POR BOMBAS DE CALOR**

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

*Autora: Beatriz Toledano Martínez*

*Tutor: Juan Pablo Jiménez Navarro*

MÁLAGA, junio de 2025



# 1 | Agradecimientos

*“Caminante, no hay camino, se hace camino al andar” – Antonio Machado*

A mi familia, sobre todo a mi padre y a mi madre, por haberme dado todas las oportunidades que me han permitido tener camino y sentar las bases de este.

A mi tutor, Juan Pablo, por proponerme este tema, motivarme a introducirme en este sector y no haberme dejado sola ni en el último momento.

A Alba María y Rafael José, por enseñarme que a veces también se hace camino cuando no se anda y que los gigantes son simplemente molinos. Han sido hogar cuando se está lejos de casa.

A Jesús Sánchez, por ser mi mayor mentor en la ingeniería y no perder ni un día la confianza en mí, incluso cuando parecía que mi brújula se descalibraba y no sabía por qué parte del sendero continuar.

A mis ingenieros, por haberme atado las sandalias cuando me tropezaba y el nudo se deshacía; habéis sido refugio entre risas cuando el camino se volvía cuesta arriba.

A Teodoro, por las pausas compartidas, ofrecerme su agua cuando la mía escaseaba y darme la certeza de que no caminaba sola.

A cada uno de los pétalos de mi biznaga, que, siendo tan únicos y distintos, han impregnado el camino con un aroma que me ha dejado el ‘corazón esponjao’.

Por último, a mi vocación, que me ha hecho caminante constante, capaz de aguantar el proceso para llegar al propósito.

Sin todo ello, habría llegado a la meta también, pero con los pies más heridos y el alma más cansada.

*“Caminante, no hay camino, sino estelas en la mar” – Antonio Machado*



## 2 | Resumen

Este trabajo analiza, en el contexto del parque residencial español, el potencial de implementar bombas de calor en los sistemas de calefacción existentes en las viviendas, actualmente basados en calderas de gas, sin modificar ni la envolvente térmica ni las unidades terminales (radiadores). Se evalúa su eficacia como estrategia para avanzar en la descarbonización del parque residencial español y conseguir los objetivos climáticos de la UE.

En primer lugar, se presenta el contexto normativo y europeo, centrándose en la necesidad de implementar tecnologías limpias en los sistemas térmicos para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. A continuación, se describen los métodos seguidos para estimar las demandas térmicas de calefacción y refrigeración, calcular la cobertura efectiva de las bombas y evaluar su impacto económico y ambiental frente a un sistema convencional alimentado exclusivamente por gas natural.

El análisis se basa en un conjunto de datos climáticos y constructivos clasificados según zona climática, tipología y año constructivo de la vivienda. A partir de esta información, y siguiendo el conjunto de métodos definidos, se calcula la demanda y consumo energéticos, emisiones de CO<sub>2</sub> y el rendimiento del sistema mediante un modelo de simulación desarrollado en Python.

Los resultados revelan la importancia de la envolvente térmica en la eficiencia del sistema. Las viviendas más recientes consiguen que la bomba cubra más del 85 % de la demanda, generando ahorros económicos y reducciones de emisiones significativas. En cuanto a viviendas más antiguas, el impacto es menor, pero siguen siendo relevantes.

Este estudio evidencia la viabilidad técnica de adoptar soluciones basadas en bombas de calor al parque edificatorio español, incluso en escenarios donde no se realizan reformas en la envolvente o los radiadores existentes.

## 3 | Abstract

This work analyses, in the context of the Spanish residential stock, the potential of implementing heat pumps in existing heating systems in dwellings based on gas boilers, without modifying the thermal envelope or terminal units (radiators). Its effectiveness as a strategy to advance the decarbonisation of the Spanish residential stock and achieve the EU's climate targets is assessed.

First, an overview of the European regulatory context, focusing on the need to implement clean technologies in thermal systems to reduce CO<sub>2</sub> emissions is covered. Then, the methods used to estimate thermal demands and energy consumption for heating and cooling, are calculated to quantify the effective coverage provided by heat pumps and compare their economic and environmental impact, with respect to a conventional system based exclusively on a natural gas boiler.

The analysis is based on a set of climatic and construction data classified according to climate zone, dwelling typology and construction period. From this data and following the processes defined in the methods, the energy demand and consumption, and performance of the system is calculated using tools developed in Python for this project.

The results reveal the importance of the thermal envelope in the system efficiency. Newer dwellings show higher heating demand coverage rate by heat pumps, generating significant economic savings and emission reductions. In older buildings, the impact is lower but still significant.

This study demonstrates the technical feasibility of adopting heat pump-based solutions to the Spanish residential stock, even in scenarios where no envelope or radiator renovations are carried out.

## 4 | Terminología y abreviaturas

- **TFG:** Trabajo fin de grado.
- **GEI:** Gases de efecto invernadero.
- **NBE:** Normas Básicas de la Edificación.
- **BdC:** Bomba de calor.
- **EBEM:** Energy Building Emission Model.
- **JRC:** Joint Research Centre.
- **CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono.
- **SFH:** Single-Family House.
- **MFH:** Multi-Family House.
- **LMFH:** Long Multi-Family House.
- **PVGIS:** Photovoltaic Geographical Information System.
- **TMY:** Typical Meteorological Year.
- **COP:** Coefficient of Performance.
- **PLR:** Part Load Ratio.
- **EER:** Energy Efficiency Ratio.
- **OPEX:** Operating Expenses.
- **CTE:** Código Técnico de la Edificación.

# Índice

<b>1</b>	<b>Agradecimientos</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Terminología y abreviaturas</b>	<b>5</b>
	<b>Índice</b>	<b>6</b>
	<b>Índice de figuras</b>	<b>7</b>
	<b>Índice de Tablas</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Introducción</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Métodos</b>	<b>11</b>
6.1	Variables y condiciones de partida . . . . .	14
6.2	Estimación de la demanda . . . . .	16
6.3	Sistemas de climatización . . . . .	21
6.3.1	Bombas de calor . . . . .	22
6.3.2	Calderas de gas . . . . .	27
6.4	Radiadores . . . . .	28
6.5	Evaluación de la instalación modelada . . . . .	30
<b>7</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>33</b>
7.1	Evaluación del impacto ambiental de la adaptación de los sistemas térmicos . . . . .	33
7.1.1	Horas anuales de funcionamiento por sistema . . . . .	33
7.1.2	Cobertura de la demanda de calefacción. . . . .	34
7.1.3	Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> . . . . .	36
7.1.4	Análisis según periodo constructivo . . . . .	37
7.2	Evaluación económica . . . . .	38
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>Anexos</b>	<b>42</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>55</b>

# Índice de figuras

6.1	Esquema de la instalación térmica de calefacción implementada en el modelo . . . . .	11
6.2	Métodos para determinar la demanda térmica de un edificio [9]. . . . .	13
6.3	Modelado de la vivienda de referencia . . . . .	14
6.4	COP de la bomba de calor ERGA08DV en función de las temperaturas del aire exterior y del agua . . . . .	26
6.5	COP de la bomba de calor ERGA08DV en función del PLR y del $COP_{teórico}$ . . . . .	26
6.6	Temperatura de impulsión de los radiadores necesaria en función de la demanda térmica	30
7.1	Horas anuales de funcionamiento por sistema según zona, tipología y período constructivo	34
7.2	Cobertura térmica de la bomba de calor y la caldera según zona, tipología y período constructivo . . . . .	35
7.3	Emisiones anuales de CO <sub>2</sub> según zona, tipología y período constructivo . . . . .	36
7.4	Comparativa del coste operativo (OPEX) con y sin bomba de calor según zona, tipología y período constructivo . . . . .	38

# Índice de Tablas

6.1	Valores $U$ ( $W/m^2K$ ) para tipología SFH [14] . . . . .	15
6.2	Valores $U$ ( $W/m^2K$ ) para tipología MFH [14] . . . . .	15
6.3	Valores $U$ ( $W/m^2K$ ) para tipología LMFH [14] . . . . .	16
6.4	Parámetros utilizados en el balance térmico del edificio . . . . .	21
6.5	Coefficientes de la bomba de calor . . . . .	24

## 5 | Introducción

La descarbonización del parque edificatorio constituye uno de los pilares fundamentales de la transición energética en Europa. Según estudios de la Comisión Europea, los edificios son responsables del 40 % del consumo energético y del 36 % de las emisiones de GEI [1], siendo el sector residencial un factor clave en esta ecuación. Dicha situación se debe a la antigüedad del parque edificatorio existente y a la fuerte dependencia de los sistemas de calefacción basados en combustible fósiles. En 2020, el 64 % de la energía utilizada en los hogares europeos se destinó a calefacción y más de la mitad procedía de gas natural y derivados del petróleo [2].

En el caso de España, el estudio del parque residencial es relevante, pues presenta una notable concentración de viviendas contruidas entre las décadas de 1960 y 1980, coincidiendo con periodos de fuerte crecimiento urbano y escasa exigencia normativa en materia energética. La mayoría de viviendas existentes, al edificarse antes de la década de los 80 -época en la que se publicó la primera normativa térmica, la NBE-CT-79- carecen de un adecuado aislamiento térmico y cuentan con sistemas de calefacción basados en el gas natural.

La búsqueda de UE por cumplir los objetivos del Pacto Verde Europeo —reducir las emisiones en un 55 % para 2030 y alcanzar la neutralidad climática en 2050— [3] y las iniciativas del plan REPowerEU [4] consiguen que, en este ámbito residencial, se establezca un objetivo: sustituir progresivamente las calderas de combustibles fósiles por tecnologías limpias como las bombas de calor. Sin embargo, se encuentran desafíos al intentar adaptar sistemas existentes, diseñados para operar con temperaturas elevadas, a las tecnologías limpias.

Debido a ello, el presente proyecto trata de responder a la incógnita de si es viable obtener el confort térmico que existe actualmente al electrificar el parque residencial mediante bombas de calor, sin intervenir en los radiadores ni en la envolvente de las viviendas, y obtener al mismo tiempo reducciones significativas en el consumo energético y en la emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para responder esta cuestión, se ha realizado un análisis detallado de distintas viviendas representativas del parque residencial español, diferenciadas por zona climática, tipología y año de construcción. Se parte del supuesto de que todas las viviendas cuentan con un sistema térmico formado por caldera de gas y radiadores para calefacción, y por una bomba de calor para refrigeración. A partir de esto, se ha evaluado el rendimiento energético, económico y ambiental de la implementación de una bomba de calor aire-agua a ese sistema base de calefacción, operando bajo las mismas condiciones de diseño que

el sistema original.

Este enfoque, que prescinde de reformas estructurales, resulta especialmente significativo en viviendas antiguas, donde la renovación de la envolvente térmica o de los emisores puede implicar costes elevados y dificultades técnicas. Además, se analizan los costes operativos (OPEX) y las emisiones asociadas, con el objetivo de valorar la viabilidad técnica y la sostenibilidad de la solución propuesta.

Un factor a tener en cuenta, demostrado en diversos estudios, es el sobredimensionamiento respecto a la carga térmica real de los sistemas de calefacción instalados en viviendas. Por ejemplo, un estudio en Dinamarca mostraba que el 80 % de los sistemas de calefacción de las viviendas estaba sobredimensionado mayoritariamente entre el 20 % y el 30 % [5]. Otro estudio en Suecia también mostraba el sobredimensionamiento generalizado de los radiadores [6]. También sucede en los Países Bajos, donde se mostró que la temperatura mínima de impulsión puede ser inferior a 55°C en el 60 % de las viviendas, incluso en condiciones climáticas de diseño [7], lo que indica que los sistemas instalados están sobredimensionados respecto a las necesidades reales de calefacción.

Este margen de sobredimensionamiento representa una oportunidad técnica para la implantación de bombas de calor en todo tipo de edificios, ya que permite operar a menores temperaturas sin comprometer el confort térmico, haciendo que las bombas tengan un rendimiento óptimo al operar con temperaturas de impulsión reducidas.

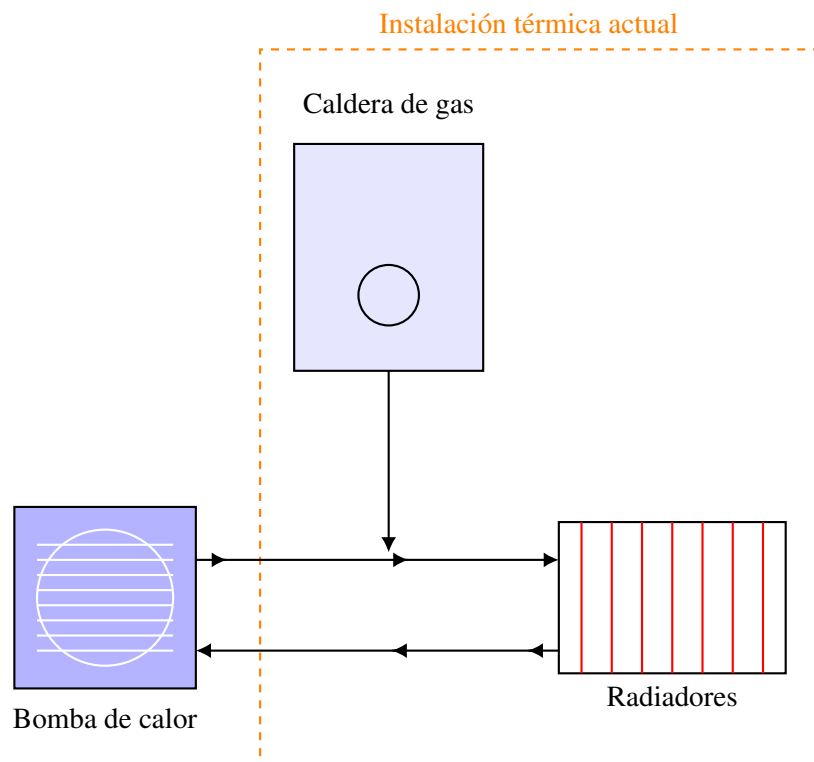
No obstante, las bombas de calor presentan ciertas limitaciones técnicas, especialmente cuando se requieren temperaturas de impulsión elevadas para garantizar el confort térmico. Para evitar esta pérdida de confort, se propone mantener la caldera existente como generador auxiliar permitiendo así alcanzar la temperatura deseada.

En definitiva, este trabajo aborda de forma rigurosa y realista los retos y oportunidades de electrificar la calefacción residencial en España mediante bombas de calor, sin reformas estructurales, con el fin de aportar evidencia técnica útil para avanzar hacia un parque edificatorio más eficiente y descarbonizado.

## 6 | Métodos

Esta sección describe los métodos empleados para cuantificar el potencial de las bombas de calor en el parque de viviendas español sin realizar ninguna modificación en las características actuales de sus envolventes térmicas ni en sus unidades terminales (radiadores). Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal es analizar el comportamiento energético de los sistemas tanto de calefacción como de refrigeración, así como el impacto ambiental asociado a la sustitución progresiva de tecnologías convencionales —como las calderas de gas— por tecnologías limpias como las bombas de calor para satisfacer la demanda térmica de los edificios.

El estudio de dichos sistemas de calefacción y refrigeración eléctricos se ha realizado con bombas de calor aire-agua reversibles con posibilidad de configurarse como sistemas híbridos al combinarlo con calderas de gas existentes o auxiliares. La atención no solo se centra en el rendimiento energético, sino en asegurar el confort térmico en todo momento, entendido como un rango de temperatura interior entre 21°C y 26°C.



**Figura 6.1.** Esquema de la instalación térmica de calefacción implementada en el modelo

Para la cuantificación de la demanda energética de las viviendas se ha empleado el modelo EBEM desarrollado por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea [8]. Este modelo, junto con la estructura metodológica propuesta en el informe técnico *Alternatives for upgrading from high-temperature to low-temperature heating systems in existing buildings: Challenges and opportunities* [9], constituyen la base sobre la que se sustenta el enfoque adoptado en este trabajo.

El desarrollo de los métodos se ha estructurado en varias fases que se describen en las siguientes subsecciones: en primer lugar, se define un modelo representativo de vivienda junto con las condiciones climáticas y de uso asociadas; a continuación, se cuantifica la demanda energética térmica teniendo en cuenta el balance entre ganancias y pérdidas; posteriormente, se realiza el dimensionamiento de los radiadores en función de la potencia requerida; seguidamente, se incorporan los sistemas de climatización seleccionados —bomba de calor aire-agua y caldera de gas—; y, finalmente, se lleva a cabo una evaluación técnica, ambiental y económica comparando el sistema convencional de caldera de gas frente al de bomba de calor.

La demanda horaria de energía térmica se ha calculado a lo largo de un año completo tomando el año 2023 como referencia. Esta demanda permite analizar el rendimiento de los sistemas térmicos tanto en su capacidad para cubrir la demanda como en el consumo energético real requerido. En el caso de los radiadores, se ha asumido que su dimensionamiento original —basado en la demanda máxima con caldera— se mantiene constante durante todo el análisis. Esto ha permitido estudiar su capacidad para alcanzar las temperaturas interiores deseadas sin modificar su tamaño ni configuración. Aunque en numerosos estudios se ha demostrado un sobredimensionado de radiadores significativo que facilitarían la adopción de bombas de calor [10], en este trabajo se ha optado por asumir un dimensionado conforme a la demanda máxima de calefacción. Esto supone una decisión conservadora desde el punto de vista de la evaluación de las bombas de calor.

Los resultados obtenidos permiten cuantificar:

- El coste energético anual asociado a cada sistema.
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el uso de calderas de gas y bombas de calor.
- El impacto económico y ambiental derivado de la transición energética.

La Figura 6.2 muestra un esquema general del proceso seguido para el proyecto.

Con el fin de representar el parque edificatorio español de forma realista y con mayor precisión, se ha segmentado el parque residencial considerando dos criterios clave: el año de construcción y la tipología de la vivienda. Los periodos representados son: <1940, 1941-1960, 1961-1980, 1981-2007 y 2008-2011[11].

Además, se han seleccionado tres ciudades representativas de distintas zonas climáticas del país: Bilbao (zona climática C1), con inviernos moderados y veranos suaves ; Madrid (zona climática D3), caracterizada por inviernos fríos y veranos calurosos; y Málaga (zona climática A3) con inviernos cálidos

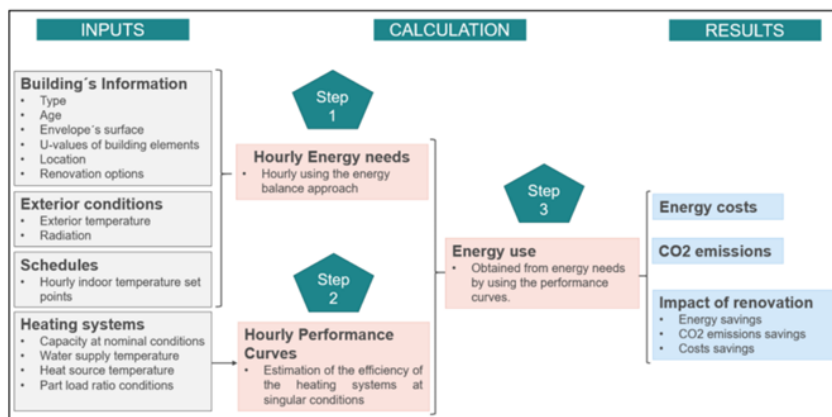


Figura 6.2. Métodos para determinar la demanda térmica de un edificio [9].

y veranos calurosos. En cada una de ellas se han evaluado tres tipologías de vivienda comunes en el territorio nacional:

- **Vivienda unifamiliar (SFH):** destinada a albergar una sola familia.
- **Vivienda multifamiliar (MFH):** diseñada para albergar a varias familias en un mismo edificio, así como bloques de pisos o apartamentos.
- **Vivienda multifamiliar grande (LMFH):** similar a la MFH, pero con un mayor número de unidades residenciales.

Esta combinación de zonas climáticas, periodos constructivos y tipos edificatorios ofrece un amplio marco que permite analizar el rendimiento de los sistemas térmicos en contextos variados y representativos. En conjunto, los resultados obtenidos contribuyen a identificar las oportunidades y desafíos asociados a la rehabilitación energética de edificios existentes sin modificar su envolvente ni la instalación de los radiadores.

Por otro lado, es importante señalar que el análisis se ha realizado de forma independiente de la orientación de la vivienda a través de un modelo que ofrece idénticas características para cada orientación. Esta simplificación asume un escenario menos favorable de forma intencionada, minimizando el efecto de factores arquitectónicos como la reducción del uso de calefacción en las viviendas con orientación sur.

A lo largo de este capítulo se detallará el procedimiento de cálculo empleado para la obtención de los resultados, incluyendo las hipótesis asumidas, las variables consideradas y los criterios de evaluación aplicados. Con ello, se pretende ofrecer una visión clara y comprensible del proceso metodológico seguido.

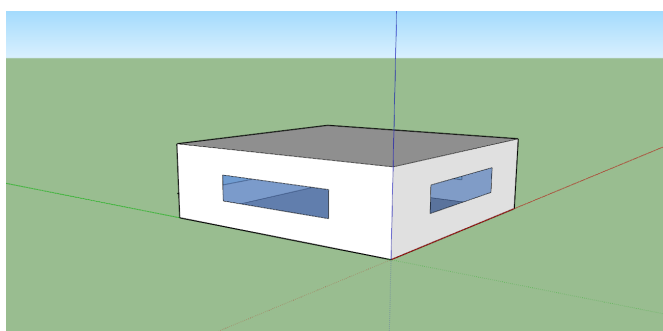
## 6.1. Variables y condiciones de partida

Las fuente de información utilizada para la realización del modelado del estudio provienen de dos bases de datos reconocidas a nivel europeo: TABULA WebTool [12] y la base de datos PVGIS[13].

TABULA WebTool [12] es una aplicación web desarrollada en el marco de los proyectos europeos de Energía Inteligente: TABULA y EPISCOPE. Esta base de datos web clasifica el parque residencial según el tamaño y el año de construcción de los edificios. Además, proporciona los valores que caracterizan a los edificios residenciales de los distintos países europeos: la apariencia visual, los elementos constructivos, los valores U (aislamiento térmico), los sistemas de suministro de calor, el consumo energético y las medidas de ahorro energético. Esta información resulta clave para definir con precisión los parámetros base de las viviendas analizadas.

La base datos PVGIS [13] es una herramienta de acceso online, desarrollada por el EU Science Hub. Proporciona información meteorológica y de irradiación solar a partir de la localización geográfica seleccionada, factores claves en el estudio de la demanda térmica. Para este trabajo se han utilizado los datos meteorológicos típicos (TMY) correspondientes al año 2023, que permiten representar de forma realista las condiciones climáticas en cada una de las ciudades analizadas.

El análisis de los tres tipos de viviendas a lo largo de las distintas etapas en las tres ciudades seleccionadas —Bilbao, Madrid y Málaga—, vivienda unitaria de referencia, cuyas características geométricas son las siguientes: cuatro paredes de  $30\text{ m}^2$ , suelo de  $100\text{ m}^2$ , cubierta de  $100\text{ m}^2$  y una ventana en cada pared de  $5\text{ m}^2$ , obteniéndose un volumen total de  $300\text{ m}^3$ . Esta vivienda permite observar el impacto de las condiciones climáticas en el rendimiento energético y las renovaciones necesarias según la región climática. Las características de la envolvente del edificio -los valores de U-, así como el área de los distintos elementos constructivos que lo componen (fachadas, cubiertas, ventanas,etc), se recogen en las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3. Además, para facilitar la visualización de su geometría, se ha desarrollado un modelo en la aplicación SketchUp, tal y como se muestra en la Figura 6.3.



**Figura 6.3.** Modelado de la vivienda de referencia

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Ciudad	Zona	<1940	41-60	61-80	81-07	08-11
Pared	30	Bilbao	C1	2.12	2.12	1.85	1.50	0.95
		Madrid	D3	2.12	2.12	1.85	1.30	0.86
		Málaga	A3	2.12	2.12	1.85	1.50	1.22
Suelo	100	Bilbao	C1	1.45	1.45	1.52	1.28	0.65
		Madrid	D3	1.45	1.45	1.52	1.14	0.64
		Málaga	A3	1.45	1.45	1.52	1.28	0.69
Cubierta	100	Bilbao	C1	2.47	2.47	2.03	1.40	0.65
		Madrid	D3	2.47	2.47	2.03	0.90	0.49
		Málaga	A3	2.47	2.47	2.03	1.40	0.65
Ventana	5	Bilbao	C1	4.24	4.24	4.24	4.69	4.40
		Madrid	D3	4.24	4.24	4.24	3.05	3.50
		Málaga	A3	4.24	4.24	4.24	4.69	5.70

**Tabla 6.1.** Valores U (W/m<sup>2</sup>K) para tipología SFH [14]

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Ciudad	Zona	<1940	41-60	61-80	81-07	08-11
Pared	30	Bilbao	C1	2.12	2.08	1.50	1.50	0.95
		Madrid	D3	2.12	2.08	1.30	1.30	0.86
		Málaga	A3	2.12	2.08	1.50	1.50	1.22
Suelo	100	Bilbao	C1	1.15	1.15	1.15	1.06	0.65
		Madrid	D3	1.15	1.15	1.15	0.94	0.64
		Málaga	A3	1.15	1.15	1.15	1.06	0.69
Cubierta	100	Bilbao	C1	2.21	2.21	1.70	1.40	0.65
		Madrid	D3	2.21	2.21	1.70	0.90	0.49
		Málaga	A3	2.21	2.21	1.70	1.40	0.65
Ventana	5	Bilbao	C1	4.24	4.24	4.24	4.69	4.40
		Madrid	D3	4.24	4.24	4.24	3.05	3.50
		Málaga	A3	4.24	4.24	4.24	4.69	5.70

**Tabla 6.2.** Valores U (W/m<sup>2</sup>K) para tipología MFH [14]

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Ciudad	Zona	<1940	41–60	61–80	81–07	08–11
Pared	30	Bilbao	C1	1.94	1.81	1.68	1.50	0.95
		Madrid	D3	1.94	1.81	1.68	1.30	0.86
		Málaga	A3	1.94	1.81	1.68	1.50	1.22
Suelo	100	Bilbao	C1	1.15	1.15	1.12	1.06	0.65
		Madrid	D3	1.15	1.15	1.12	0.94	0.64
		Málaga	A3	1.15	1.15	1.12	1.06	0.69
Cubierta	100	Bilbao	C1	2.06	1.74	1.74	1.40	0.65
		Madrid	D3	2.06	1.74	1.74	0.90	0.49
		Málaga	A3	2.06	1.74	1.74	1.40	0.65
Ventana	5	Bilbao	C1	4.24	4.24	4.24	4.69	4.40
		Madrid	D3	4.24	4.24	4.24	3.05	3.50
		Málaga	A3	4.24	4.24	4.24	4.69	5.70

**Tabla 6.3.** Valores U (W/m<sup>2</sup>K) para tipología LMFH [14]

## 6.2. Estimación de la demanda

La demanda térmica de los edificios se ha estimado mediante la realización de un balance energético de cada hora del año, considerando tanto las pérdidas como las ganancias térmica en cada tipología de vivienda.

La energía necesaria para mantener las condiciones interiores en el confort térmico deseado se establece por medio del equilibrio entre las pérdidas y las ganancias térmicas mencionadas anteriormente y que son desarrolladas más adelante. No obstante, cuando la temperatura interior no permanece constante —como ocurre en los momentos en los que el sistema de calefacción se enciende y se apaga—, es necesario considerar la inercia térmica del edificio.

Por ejemplo, si el edificio se encuentra a 20 °C y se desea aumentar la temperatura a 21 °C, el sistema de calefacción no solo debe compensar las pérdidas térmicas existentes, sino también aportar la energía suficiente para incrementar la temperatura del aire interior del edificio.

Esto se refleja en el balance energético expresado a continuación:

$$Q_{\text{térmica}} = \phi_{\text{pérdidas}} - \phi_{\text{ganancias}} + A \cdot C_b \cdot \frac{dT_b}{dt} \quad (6.1)$$

Donde:

- $Q_{\text{térmica}}$  : Demanda térmica de la vivienda [kWh].

- $\phi_{\text{pérdidas}}$  : Pérdidas térmicas de la vivienda [kWh].
- $\phi_{\text{ganancias}}$  : Ganancias térmicas del edificio [kWh].
- $A$  : Superficie de la vivienda [ $\text{m}^2$ ].
- $C_b$  : Capacidad térmica del edificio por unidad de superficie. TABULA[12] adopta un valor típico de  $45 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$ .
- $T_b$  : Temperatura interna del edificio [ $^\circ\text{C}$ ].

A continuación, se van a desglosar las pérdidas y las ganancias para poder comprender el balance en su totalidad.

## Pérdidas térmicas

Las pérdidas térmicas se producen debido a la transferencia de calor de un área más caliente a un área más fría, lo que genera una pérdida o ganancia de energía. Su ecuación se define como:

$$\phi_{\text{pérdidas}} = \phi_{\text{conducción}} + \phi_{\text{ventilación}} + \phi_{\text{radiación}} \quad (6.2)$$

### Conducción

Son las pérdidas térmicas que se producen a través de los elementos de la envolvente del edificio (muros, cubiertas, suelos, ventanas, etc.) como consecuencia de la diferencia de temperatura entre el ambiente interior y el exterior. Su cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_{\text{conducción}} = \left( \sum A_i \cdot U_i \cdot b_i \right) \cdot (T_b - T_{\text{ext}}) \quad (6.3)$$

Donde:

- $A_i$  : Área del elemento de la envolvente del edificio en contacto con el aire exterior [ $\text{m}^2$ ].
- $U_i$  : Valor de U según el elemento de la envolvente del edificio en contacto con el aire exterior [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ].
- $b_i$  : Factor de ajuste del suelo. TABULA [12] adopta un valor típico de 1.
- $T_b$  : Temperatura interna del edificio [ $^\circ\text{C}$ ].
- $T_{\text{ext}}$  : Temperatura exterior del edificio [ $^\circ\text{C}$ ].

### Ventilación

Son las pérdidas térmicas asociadas a la necesidad de calentar el aire exterior que se introduce en el edificio para garantizar las condiciones de confort térmico en el interior. La ecuación utilizada para su cálculo es:

$$\phi_{\text{ventilación}} = \eta_{\text{air}} \cdot V \cdot C_p \cdot (T_b - T_{\text{ext}}) \quad (6.4)$$

Donde:

- $\eta_{\text{air}}$  : El aire exterior que entra al edificio en una hora, es decir, las renovaciones hora del aire. Se adopta, siguiendo la base de datos de TABULA [12], un valor típico de 0.4 [1/h].
- $V$  : Volumen interior del edificio [m<sup>3</sup>].
- $C_p$  : Coeficiente específico del calor del aire exterior. Se adopta un valor típico de 0.34 [W/(m<sup>3</sup> · K)].
- $T_b$  : Temperatura interna del edificio [°C].
- $T_{\text{ext}}$  : Temperatura exterior del edificio [°C].

### Radiación

Estas pérdidas térmicas se deben a la emisión de energía desde la envolvente del edificio hacia el cielo, como consecuencia de la diferencia de temperatura entre ambas superficies. Su ecuación se define como:

$$\phi_{\text{radiación}} = F_{\text{sky}} \cdot h_{re} \cdot \Delta T_{\text{sky}}$$

Donde:

- $F_{\text{sky}}$  : Factor del cielo. Se adopta un valor típico de 1 en las envolventes horizontales y 0.5 en envolventes verticales.
- $h_{re}$  : Coeficiente de radiación del cielo. Se toma un valor de 5 [W/(m<sup>2</sup> · K)].
- $\Delta T_{\text{sky}}$  : Temperatura del cielo. Se adopta un valor de 11 siguiendo la sugerencia de la norma ISO 52016-2017 [15] [°C].

### Ganancias térmicas

La otra parte a considerar en el balance energético son las ganancias térmicas, las cuales pueden clasificarse en dos tipos: ganancias internas, generadas por la actividad dentro del edificio (personas, equipos, iluminación, etc.), y ganancias solares, debidas a la radiación que atraviesa los distintos elementos de la envolvente, tanto transparentes (como ventanas) como opacos (como muros o cubiertas). Las ganancias se pueden definir como:

$$\phi_{ganancias} = \phi_{int} + \phi_{solar}$$

### Ganancias internas

Las ganancias térmicas internas ( $\phi_{int}$ ) se definen como la energía media aportada al edificio por fuentes de calor internas por metro cuadrado [ $W/m^2$ ]. En el estudio las fuentes internas consideradas para la modelización del balance energético han sido:

- **Personas:** 215 W entre las 00:00–08:00 y las 16:00–24:00 horas.
- **Iluminación:** 500 W siempre que haya personas presentes, concretamente entre las 06:00–09:00 y las 18:00–23:00 horas.
- **Equipos:** 300 W entre las 08:00–09:00 y a partir de las 16:00 horas.

Estas condiciones horarias se han utilizado para estimar el perfil de ganancias internas y su contribución al balance térmico diario del edificio.

### Ganancias solares

Las ganancias solares representan la energía térmica que el edificio recibe a través de la radiación solar incidente sobre sus elementos constructivos. Esta energía depende de la cantidad de radiación absorbida por la envolvente, y está influenciada por propiedades como el color, la transmitancia y la reflectividad de los materiales (especialmente en superficies transparentes y opacas). Su cálculo puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_{solar} = F_{sh} \cdot (1 - F_F) \cdot F_W \cdot g_{gl,n} \cdot \left( \sum A_{w,j} \cdot I_j \right) + F_{ob} \cdot \alpha_{op} \cdot R_{se} \cdot U_i \cdot A_i \quad (6.5)$$

- $F_{sh}$ : Factor de reducción por sombra. Se considera un valor de 0.8 en la horizontal y 0.6 en la vertical.
- $F_F$ : Fracción de la parte opaca de la ventana, con un valor adoptado de 0.3.
- $F_W$ : Factor de reducción que considera la radiación no perpendicular al acristalamiento; se toma como 0.9.
- $g_{gl,n}$ : Transmitancia total de energía solar para radiación perpendicular al vidrio; valor considerado: 0.85.
- $A_{w,j}$ : Superficie acristalada con orientación  $j$  (norte, sur, este, oeste) [ $m^2$ ].
- $I_j$ : Radiación solar global media sobre superficies con orientación  $j$  [ $W/m^2$ ].
- $F_{ob}$ : Factor de forma entre el edificio y el cielo, valor adoptado: 0.5.

- $\alpha_{op}$ : Coeficiente de absorción de la parte opaca de la envolvente. Se ha considerado un valor de 0.1.
- $R_{se}$ : Resistencia térmica superficial exterior. Valor de referencia:  $0.04 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]}$ , según ISO 6946 [16].
- $U_i$ : Valor de U del elemento opaco (la envolvente del edificio)  $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ .
- $A_i$ : Superficie del elemento opaco (la envolvente del edificio)  $[\text{m}^2]$ .

La radiación solar global media correspondiente a cada orientación se ha calculado en función de la latitud y altitud de cada ciudad analizada. El código empleado para la obtención de estos valores se encuentra disponible en el capítulo de Anejos 9.

Para una mayor claridad de los datos con los que se ha realizado el balance térmico, se expone a continuación una tabla con todos ellos.

**Tabla 6.4.** Parámetros utilizados en el balance térmico del edificio

Parámetro	Unidad	Valor
$A$	$m^2$	–
$C_b$	$Wh/m^2 \cdot ^\circ C$	150
$T_b$	$^\circ C$	–
$T_{ext}$	$^\circ C$	–
$A_i$	$m^2$	–
$U_i$	$W/m^2 \cdot K$	–
$b_i$	adimensional	1
$\eta_{air}$	1/h	0.05
$V$	$m^3$	300
$C_p$	$W/m^3 \cdot K$	0.34
$F_{sky}$	adimensional	1 (hor.) / 0.5 (vert.)
$h_{re}$	W/K	–
$\Delta T_{sky}$	$^\circ C$	11
$\phi_{int}$	$W/m^2$	–
$F_{sh}$	adimensional	0.8 (hor.) / 0.6 (vert.)
$F_F$	adimensional	0.3
$F_W$	adimensional	0.9
$g_{gl,n}$	adimensional	0.85
$A_{w,j}$	$m^2$	–
$I_j$	$W/m^2$	–
$F_{ob}$	adimensional	0.5
$\alpha_{op}$	adimensional	0.1
$R_{se}$	$m^2 \cdot K/W$	0.04

### 6.3. Sistemas de climatización

Un sistema de climatización se compone de los dispositivos encargados de mantener unas condiciones térmicas confortables en el interior de los edificios. Su objetivo principal es ajustar la temperatura del ambiente en función de las necesidades de los ocupantes, independientemente de las condiciones

climáticas exteriores. En este trabajo, el análisis se centra en los sistemas activos de climatización, es decir, aquellos que requieren un aporte energético externo para su funcionamiento y que complementan a los elementos pasivos del edificio. Bajo esta categoría se engloban tanto los sistemas de calefacción como los de refrigeración.

El sistema de climatización implementado en el modelo de este trabajo está compuesto, en el caso de la calefacción, por un sistema híbrido formado por una bomba de calor aire-agua reversible y una caldera auxiliar. Para la refrigeración, el mismo equipo de bomba de calor proporciona el servicio, operando en modo inverso. Por tanto, calefacción y refrigeración se gestionan con un único dispositivo, cuya versatilidad se explica en detalle más adelante.

### 6.3.1. Bombas de calor

#### 6.3.1.1. Concepto y funcionamiento general de la bomba de calor

La bomba de calor es un sistema térmico capaz de transferir calor desde un foco frío hacia un foco caliente empleando un gas refrigerante que circula en un ciclo termodinámico cerrado [17]. Esta transferencia de energía, contraria al flujo natural del calor, se consigue gracias al trabajo suministrado por un compresor.

En régimen de calefacción, se transfiere calor del entorno natural —aire, agua o tierra— al interior del espacio a climatizar, de modo que este fluya desde una temperatura más baja (foco frío) hacia una más alta (foco caliente). En régimen de refrigeración, mediante un ciclo reversible, la bomba de calor actúa a la inversa: el exterior está más caliente que el interior, por lo que la bomba de calor extrae el calor de la zona a climatizar y lo cede al entorno natural.

Las bombas de calor desempeñan un papel clave en la transición hacia un modelo energético más sostenible. Este tipo de tecnología captura la energía procedente de fuentes renovables —como el aire, el suelo o las aguas superficiales— y la convierte en energía utilizable. Esto se traduce en un menor consumo asociado al funcionamiento del compresor —procedente de fuentes no renovables— y, por tanto, en una reducción de las emisiones indirectas de CO<sub>2</sub>.

#### 6.3.1.2. Clasificación de las bombas de calor

Las bombas de calor pueden clasificarse, de forma general, en función del entorno del que extraen la energía térmica [18]. Según la fuente utilizada como foco frío, se distinguen tres grandes tipos:

- **Bombas de calor aerotérmicas:** captan calor del aire exterior.
- **Bombas de calor hidrotérmicas:** aprovechan el calor contenido en aguas superficiales, como ríos, lagos o mares.

- **Bombas de calor geotérmicas:** intercambian calor con el subsuelo, donde las temperaturas son más estables a lo largo del año.

A un nivel más específico, también es habitual clasificarlas atendiendo al tipo de fluido con el que se realiza el intercambio térmico, tanto en el lado exterior como en el lado interior. El primer término hace referencia al medio del que se extrae el calor, y el segundo, al medio al que se entrega. Algunas combinaciones comunes son :

- Bomba de calor aire-aire
- Bomba de calor aire-agua
- Bomba de calor agua-aire
- Bomba de calor agua-agua
- Bomba de calor tierra-aire
- Bomba de calor tierra-agua

### 6.3.1.3. Parámetros de rendimiento

El rendimiento del ciclo de una bomba de calor depende fundamentalmente de las temperaturas del foco frío y del foco caliente. Para cuantificar dicho rendimiento se emplean distintos parámetros:

- **Part Load Ratio (PLR).** Este parámetro indica qué proporción de la capacidad máxima de la bomba está siendo utilizada en un instante determinado. Se calcula como la relación entre la demanda térmica del edificio y la capacidad nominal de la bomba de calor:

$$PLR = \frac{Q_{\text{demanda}}}{Q_{\text{nominal}}} \quad (6.6)$$

- **Coficiente de rendimiento (COP).** Es el indicador de eficiencia energética en régimen de calefacción. Se define como la cantidad de energía térmica útil entregada al edificio por cada unidad de energía eléctrica consumida por el compresor:

$$COP = \frac{Q_{\text{útil}}}{W_{\text{eléctrico}}} \quad (6.7)$$

- **Energy Efficiency Ratio (EER).** Es el parámetro análogo al COP, pero en régimen de refrigeración. Representa la cantidad de energía térmica extraída del espacio interior (foco frío) por cada unidad de energía eléctrica consumida:

$$EER = \frac{Q_{\text{útil}}}{W_{\text{eléctrico}}} \quad (6.8)$$

**6.3.1.4. Implementación en el modelo**

La implementación de un sistema de calefacción o refrigeración en un modelo más realista requiere considerar las distintas condiciones operativas a las que se enfrenta la bomba de calor, como las variaciones de temperatura exterior o de la temperatura de impulsión del agua. Por este motivo, su funcionamiento no se representa mediante un único valor nominal, sino que se ha aplicado un enfoque en dos etapas que permite tener en cuenta tanto las temperaturas de funcionamiento como el régimen de carga parcial.

En el modelo desarrollado para este trabajo se ha implementado una bomba de calor aire-agua reversible, concretamente el modelo *ERGA08DV* del fabricante *DAIKIN*, cuyas características se han tomado como referencia para la simulación.

Para caracterizar el rendimiento de dicha bomba, se ha calculado el COP teórico a partir de una ecuación bicuadrática que depende de la temperatura exterior del aire ( $T_{air}$ ) y de la temperatura del agua de impulsión ( $T_{water}$ ):

$$COP_t = a + b \cdot T_{air} + c \cdot T_{air}^2 + d \cdot T_{water} + e \cdot T_{water}^2 + f \cdot T_{water} \cdot T_{air} \quad (6.9)$$

Esta expresión, cuyos coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $f$  se han obtenido a partir de datos del catálogo del fabricante, permite modelar el comportamiento de la bomba en función de las distintas condiciones térmicas en cada instante. Dichos coeficientes según el modo de funcionamiento de la bomba son:

**Tabla 6.5.** Coeficientes de la bomba de calor

Coeficiente	Calefacción	Refrigeración
$a$	9.794336687	8.297341965
$b$	-0.243936045	0.135297467
$c$	0.001814978	0.002869829
$d$	0.292621885	-0.26492478
$e$	0.002104749	0.003052294
$f$	-0.004500915	-0.002215586

Cabe destacar que, para el cálculo del COP teórico en modo calefacción, la temperatura del agua de impulsión ( $T_{water}$ ) se ha definido como la temperatura de suministro requerida por los radiadores ( $T_{supply}$ ). En el modelo se ha establecido un valor máximo de 55 °C, correspondiente a la temperatura máxima que puede alcanzar la bomba seleccionada. En el caso del modo refrigeración, se ha considerado una temperatura de impulsión constante de 18 °C.

Además, para asegurar la cobertura total tanto en refrigeración como en calefacción, la capacidad no-

minal de la bomba no ha sido fijada de forma genérica, sino que se ha ajustado dinámicamente en función de la potencia máxima requerida para cada combinación de ciudad, tipología y período de construcción.

Continuando con el rendimiento de la bomba, a partir del COP hallado, se ha ajustado en función del régimen de carga mediante el uso del *Part Load Ratio* (PLR), con el objetivo de reflejar la pérdida de eficiencia que se produce cuando la bomba no trabaja a plena carga. El COP real se calcula mediante la siguiente expresión:

$$COP_{\text{real}} = \frac{PLR}{PLR \cdot C_c + (1 - C_c)} \cdot COP_{\text{teórico}} \quad (6.10)$$

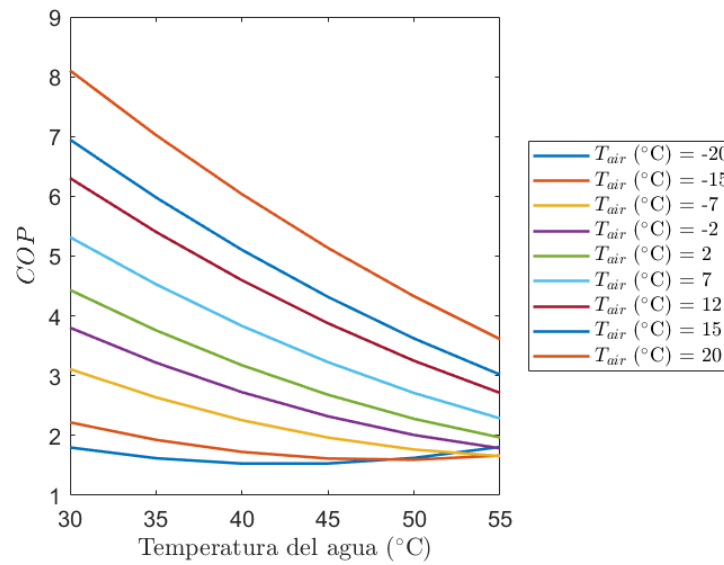
donde  $C_c$  es un coeficiente que representa la eficiencia relativa en carga parcial frente al funcionamiento a plena carga. Esta formulación permite tener en cuenta tanto las condiciones térmicas como el nivel de carga en cada momento del año. Para la bomba de calor seleccionada en este estudio, el valor de  $C_c$  es igual a 0.9.

Analizando el COP de la bomba implementada, se observa en la primera gráfica (6.4) que dicho coeficiente disminuye a medida que aumenta la temperatura de impulsión del agua. El salto térmico entre el aire exterior (foco frío) y la zona a climatizar (foco caliente) exige un esfuerzo mayor por parte del compresor. En consecuencia, se produce una reducción de la eficiencia del sistema, lo que se refleja en un menor valor del COP.

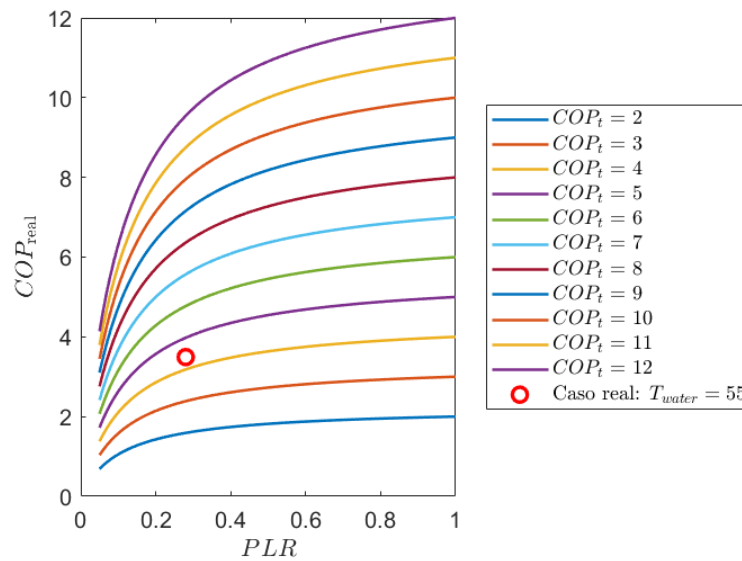
La segunda gráfica (6.5) muestra la evolución del rendimiento real de la bomba de calor ( $COP_{\text{real}}$ ) en función del *Part Load Ratio* (PLR), para distintos valores de  $COP_{\text{teórico}}$ . Estas curvas permiten visualizar cómo la eficiencia del sistema se ve penalizada en condiciones de carga parcial, es decir, cuando el PLR es inferior a la unidad.

Como puede observarse, aunque la bomba alcance un valor elevado de  $COP_{\text{teórico}}$ , su rendimiento real disminuye significativamente cuando no opera a plena carga.

En la misma figura se ha representado el caso real correspondiente a las condiciones de operación en las que la bomba trabaja con una temperatura de impulsión de 55 °C. Aunque se trata del punto de mayor exigencia térmica en cuanto a temperatura, la demanda térmica real es inferior. En consecuencia, el PLR es bajo, lo que implica que la bomba está funcionando en condiciones alejadas de su punto de máxima eficiencia, provocando una penalización del  $COP_{\text{real}}$ .



**Figura 6.4.** COP de la bomba de calor ERGA08DV en función de las temperaturas del aire exterior y del agua



**Figura 6.5.** COP de la bomba de calor ERGA08DV en función del PLR y del  $COP_{teórico}$

Una vez analizado el funcionamiento de la bomba de calor y verificado su correcto comportamiento dentro del modelo, se procede al cálculo de la demanda eléctrica horaria asociada a su operación. Esta se determina como la relación entre la demanda térmica del sistema y el coeficiente de rendimiento (COP) real en cada momento.

Con esta información, es posible estimar la demanda eléctrica total del sistema, tanto en modo calefacción como en modo refrigeración, a lo largo del periodo analizado. Estos valores serán posteriormente utilizados para evaluar el consumo energético anual, el impacto ambiental y el coste asociado a cada una

de las configuraciones analizadas.

### 6.3.2. Calderas de gas

En primer lugar, se debe conocer qué es una caldera. Desde el punto de vista de la ingeniería, una caldera es una máquina capaz de calentar un fluido caloportador, como el agua, a través de un proceso de combustión para su posterior distribución a un sistema de tuberías y emisores térmicos -como los radiadores o el suelo radiante-, proporcionando así calor a espacios habitables.

#### 6.3.2.1. Principio de funcionamiento

En este estudio se han implementado calderas de gas domésticas. Su funcionamiento, siendo éste común en la mayoría de estos equipos, se basa en el aprovechamiento del calor generado por un proceso de combustión, que se transfiere a un circuito de agua para su distribución por la vivienda.

Este proceso comienza con la combustión del gas natural, el cual se mezcla con el aire suministrado por un ventilador. A esta mezcla aire-combustión se le aplica una fuente de ignición -como una chispa- generando una llama que convierte todo el gas en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua.

A continuación, se produce el intercambio térmico, en el que el intercambiador de calor se encarga de transferir el calor a las tuberías que forman el circuito de agua. Esta agua caliente actúa como caloportador y es distribuida hacia los emisores de calor de la vivienda (radiadores o suelo radiante).

Finalmente, una vez aprovechado el calor, los gases residuales generados durante la combustión son evacuados a través de la chimenea de humos al exterior.

#### 6.3.2.2. Implementación en el modelo

La caldera en el modelo se activa cuando la bomba de calor no es capaz de satisfacer por sí sola la demanda térmica de la vivienda. Esta situación se da cuando la temperatura de impulsión requerida por los radiadores supera los  $55^\circ\text{C}$ , es decir, cuando superan el límite operativo de la bomba implementada en el modelo. En estos casos en los que la bomba alcanza su capacidad máxima sin lograr cubrir por completo las necesidades térmicas del edificio, entra en funcionamiento la caldera como sistema auxiliar, complementando la producción térmica para garantizar el confort térmico deseado.

La estimación del consumo de gas asociado al funcionamiento de la caldera, se ha considerado un rendimiento constante de 0.95, valor usual de las calderas de gas actuales. A partir de la diferencia entre la energía térmica demandada y la que puede suministrar la bomba de calor, se estima la energía que debe proporcionar la caldera. Con esta información y el rendimiento asumido, se calcula el consumo de gas necesario para cubrir dicha fracción de la demanda térmica. Este enfoque permite cuantificar de forma realista el funcionamiento conjunto de ambos sistemas, evaluando tanto su rendimiento como su impacto energético y ambiental.

## 6.4. Radiadores

Los emisores térmicos considerados en el modelo son radiadores, encargados de establecer la temperatura de impulsión de los sistemas de calefacción. Estos elementos actúan como intercambiadores de calor, transfiriendo la energía térmica del agua del circuito hidráulico al aire del ambiente de la vivienda.

Se destaca que, en todas las configuraciones del modelo, se ha mantenido constante el dimensionamiento de los radiadores, asumiendo que fueron diseñados para operar con temperaturas de impulsión elevadas, propias de las calderas, que suelen trabajar en un rango de 70-80°C, y con un salto térmico ( $\Delta T$ ) de 20°C.

El dimensionamiento de los radiadores se ha hallado aplicando el método definido en la norma UNE-EN 442-2:2015 [19], donde la potencia térmica disipada por cada placa del radiador se calcula como:

$$\Phi_2 = K_m \cdot (T_{rad,1} - T_{room})^n \quad (6.11)$$

donde la temperatura media en el radiador en condiciones de diseño se define como:

$$T_{rad,1} = \frac{T_{sup,1} + T_{sup,1}}{2} \quad (6.12)$$

Donde:

- $K_m$  : constante del radiador definida por catálogo.
- $T_{rad,1}$  : temperatura media en el radiador en condiciones de diseño [°C].
- $T_{room}$  : temperatura interior ambiente, fijada en 21 según la norma UNE [19] [°C].
- $n$  : exponente de ajuste definido por el fabricante

En este proyecto se ha seleccionado el modelo de radiador BLITZ3 (500/100), cuyas características técnicas permiten aplicar la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$\Phi_{placa} = 0,8097 \cdot \left( \frac{75 + 65}{2} - 20 \right)^{1,2767} \quad (6.13)$$

$$\Phi_{placa} = 119,51 W \quad (6.14)$$

A partir de la potencia térmica máxima que necesita cada caso, se ha determinado el número de placas necesarias para poder alcanzarla:

$$n_{placas} = \frac{Q_{\text{máx calefacción}}}{\Phi_{placa}} \quad (6.15)$$

Este número de placas, dimensionado específicamente para cada caso, se ha mantenido constante en todas las simulaciones correspondientes a ese edificio. De este modo, se garantiza que el sistema de emisión térmica refleja las limitaciones reales de una instalación ya existente y adaptada a sus condiciones de diseño iniciales.

$$\Phi_1 = n_{placas} \cdot \Phi_{placa} \quad (6.16)$$

A partir de esta potencia térmica real de referencia, se ha estimado la temperatura de suministro necesaria para satisfacer distintas demandas térmicas, sin modificar el número de placas. Para ello, se parte de la relación entre las condición nominal y las nuevas condiciones operativas:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^n \quad (6.17)$$

Es decir:

$$\frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = \left( \frac{T_{rad,2} - T_{room}}{T_{rad,1} - T_{room}} \right)^n \quad (6.18)$$

Despejando  $T_{rad,2}$ :

$$T_{rad,2} = T_{room} + (T_{rad,1} - T_{room}) \cdot \left( \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} \right)^{1/n} \quad (6.19)$$

La temperatura media del radiador en condiciones nominales se expresa como:

$$T_{rad,1} = \frac{T_{sup,1} + T_{ret,1}}{2} = T_{sup,1} - \frac{\Delta T_1}{2} \quad (6.20)$$

Y de forma análoga, para las nuevas condiciones:

$$T_{rad,2} = T_{sup,2} - \frac{\Delta T_2}{2} \quad (6.21)$$

Por otro lado, la relación entre los saltos térmicos se deduce a partir del comportamiento del emisor:

$$\frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^n \Rightarrow \Delta T_2 = \Delta T_1 \cdot \left( \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} \right)^{1/n} \quad (6.22)$$

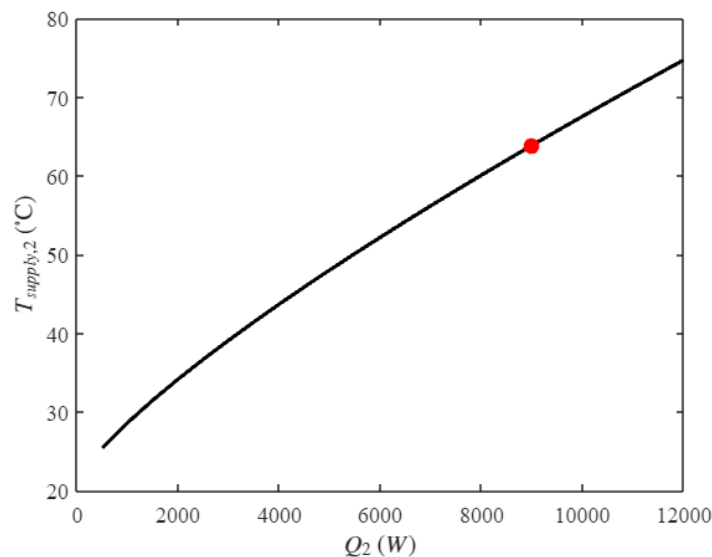
Sustituyendo estas expresiones en la ecuación de  $T_{rad,2}$ , se obtiene la fórmula para calcular la nueva temperatura de suministro:

$$T_{\text{sup},2} = \frac{\Delta T_2}{2} + T_{\text{room}} + \frac{T_{\text{sup},1} - \frac{\Delta T_1}{2} - T_{\text{room}}}{\sqrt[n]{\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2}}} \quad (6.23)$$

Con estas expresiones se ha evaluado la temperatura de impulsión necesaria que utilizan los radiadores para poder cubrir la demanda de calor ante las diferentes condiciones, manteniendo constante su dimensionamiento original.

Para poder entender el comportamiento de los radiadores completamente, se ha representado gráficamente la evolución de la temperatura de impulsión necesaria en función de distintas demandas térmicas 6.6.

El punto destacado en la gráfica corresponde al caso de una vivienda unifamiliar (SFH) en Bilbao, construida antes de 1940, cuya elevada demanda térmica obliga a mantener una temperatura de impulsión próxima a 63 °C para poder cubrir la carga de calefacción, lo que evidencia la necesidad de recurrir al sistema híbrido.



**Figura 6.6.** Temperatura de impulsión de los radiadores necesaria en función de la demanda térmica

## 6.5. Evaluación de la instalación modelada

Para evaluar el rendimiento de la instalación implementada, se ha adoptado un enfoque económico y ambiental aplicado a los resultados obtenidos. A partir del consumo energético anual, se calculan los costes operativos (OPEX) - sin considerar inversiones iniciales ni costes de mantenimiento-, así como las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del uso de electricidad y gas. Este método permite comparar el sistema base con el sistema híbrido de una forma clara y útil para el usuario sin necesidad de emplear métodos económicos complejos.

Los cálculos se realizan empleando los siguientes factores constantes:

- **Coste de la electricidad:** 0.20 €/kWh [20]
- **Coste del gas natural:** 0.10 €/kWh [21]
- **Factor de emisión de CO<sub>2</sub> de la electricidad:** 0.20 kg CO<sub>2</sub>/kWh [22]
- **Factor de emisión CO<sub>2</sub> del gas natural:** 0.20 kg CO<sub>2</sub>/kWh [23]

A partir de estos datos se determina:

- **Coste operativo de la bomba de calor con sistema híbrido ( $OPEX_{eléc}$ ):** Se calcula como la suma del consumo eléctrico anual para la calefacción y la refrigeración, multiplicado por el coste unitario de la electricidad:

$$OPEX_{eléc} = (Q_{eléc-cal} + Q_{eléc-ref}) \cdot c_{eléc} \quad (6.24)$$

Donde:

- $Q_{eléc-cal}$ : Consumo eléctrico para calefacción [kWh/año].
- $Q_{eléc-ref}$ : Consumo eléctrico para refrigeración [kWh/año].
- $c_{eléc}$ : Precio de la electricidad [€/kWh].

- **Coste operativo del sistema de caldera ( $OPEX_{gas}$ ):**

Estimado a partir del consumo anual de gas y su coste unitario:

$$OPEX_{gas} = Q_{gas} \cdot c_{gas} \quad (6.25)$$

Donde:

- $Q_{eléc-cal}$ : Consumo eléctrico para calefacción [kWh/año].
- $Q_{eléc-ref}$ : Consumo eléctrico para refrigeración [kWh/año].
- $c_{eléc}$ : Precio de la electricidad [€/kWh].

- **Coste operativo del sistema de caldera ( $OPEX_{gas}$ ):**

Estimado a partir del consumo anual de gas y su coste unitario:

$$OPEX_{gas} = Q_{gas} \cdot c_{gas} \quad (6.26)$$

Donde:

- $Q_{gas}$ : Consumo de gas [kWh/año].
- $c_{gas}$ : Precio del gas natural [€/kWh].

- **Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> ( $CO_2$ ):**

Se consideran las emisiones derivadas tanto del uso del gas como de la electricidad:

$$CO_2 = (Q_{eléc-cal} + Q_{eléc-ref}) \cdot f_{eléc} + Q_{gas} \cdot f_{gas} \quad (6.27)$$

Donde:

- $f_{\text{eléc}}$ : Factor de emisión de la electricidad [kg CO<sub>2</sub>/kWh].
- $f_{\text{gas}}$ : Factor de emisión del gas natural [kg CO<sub>2</sub>/kWh].

## 7 | Análisis de resultados

Este capítulo recoge los resultados obtenidos al aplicar los métodos desarrollados a tres tipologías representativas de vivienda ubicadas en distintas ciudades del territorio español elegidas: Bilbao, Madrid y Málaga.

El análisis se centra en determinar qué parte de la demanda térmica se cubre exclusivamente con la bomba de calor y cuál requiere apoyo de la instalación híbrida (bomba más caldera). Para ello, se consideran factores como la ubicación geográfica, la tipología edificatoria y, especialmente, las características de la envolvente térmica según el periodo de construcción, sin aplicar mejoras ni rehabilitación. Esto permite identificar qué parte del parque edificatorio permite tener una mayor cobertura de la demanda térmica mediante el uso de la bomba de calor.

Esta aproximación permite evaluar el impacto real de la solución propuesta, tanto desde el punto de vista energético y ambiental como económico, considerando únicamente los costes de operación.

### 7.1. Evaluación del impacto ambiental de la adaptación de los sistemas térmicos

Este apartado recoge el comportamiento ambiental de los sistemas considerados a través de distintos parámetros.

#### 7.1.1. Horas anuales de funcionamiento por sistema

Uno de los aspectos evaluados es el número de horas anuales de funcionamiento de los distintos sistemas térmicos tras la incorporación de la bomba de calor al sistema original. Estos resultados se representan en la Figura 7.1.

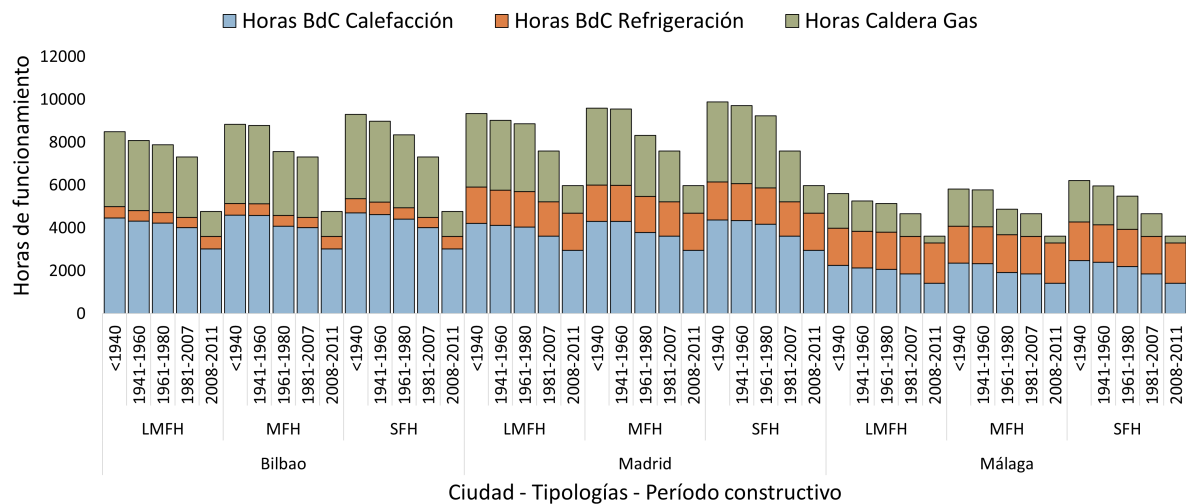
En modo refrigeración, la estrategia de funcionamiento es la misma tanto en el escenario base como en el implementado en el modelo, pues el sistema siempre opera exclusivamente mediante la bomba de calor, ya que la caldera no participa en esta etapa. En Bilbao, ciudad con veranos templados, las horas de funcionamiento rara vez superan las 600 horas anuales. Por el contrario, en Málaga, con un verano caluroso, se alcanzan valores superiores a las 1800 horas, como en el caso de un edificio multifamiliar

reciente (MFH, 2008–2011) con 1878 horas. Madrid se sitúa en una posición intermedia pero cercana a Málaga, con registros que oscilan entre las 1600 y las 1730 horas anuales. Esto pone de manifiesto que el número de horas anuales de funcionamiento en modo refrigeración está fuertemente condicionado por el clima, siendo significativamente mayor en zonas cálidas que en regiones de veranos suaves.

En modo calefacción, conviene recordar que la bomba de calor no se apaga cuando entra en funcionamiento la caldera. Ambos sistemas pueden operar simultáneamente, ya que la caldera actúa como un apoyo puntual, no como un sustituto de la bomba.

En este caso, en climas más fríos como son Madrid o Bilbao, y especialmente en viviendas antiguas, la caldera entra en funcionamiento con mayor frecuencia. Por ejemplo, en un edificio unifamiliar (SFH) anterior a 1940 en Bilbao, la bomba de calor funciona durante 4712 horas al año, de las cuales 3931 también está la caldera en funcionamiento. En cambio, para la misma tipología en el periodo comprendido entre 2008 y 2011, la bomba funciona 3019 horas de las cuales la caldera opera 1160, evidenciando una reducción significativa de la necesidad de apoyo gracias a la mejora de la envolvente en los edificios recientes.

En ciudades como Málaga, con un clima más cálido, el uso de la bomba de calor es predominante y el apoyo de la caldera pasa a tener un papel secundario. Comparando en esta misma ciudad una vivienda multifamiliar (MFH) construida antes de 1940, la bomba opera 2362 horas al año y la caldera 1733. En esa misma tipología, pero en el período de construcción de 2008-2011, la bomba trabaja 1421 horas y la caldera apenas 318, lo que demuestra cómo tanto el clima como las características constructivas influyen en la carga térmica y en la necesidad de apoyo por parte de la caldera.

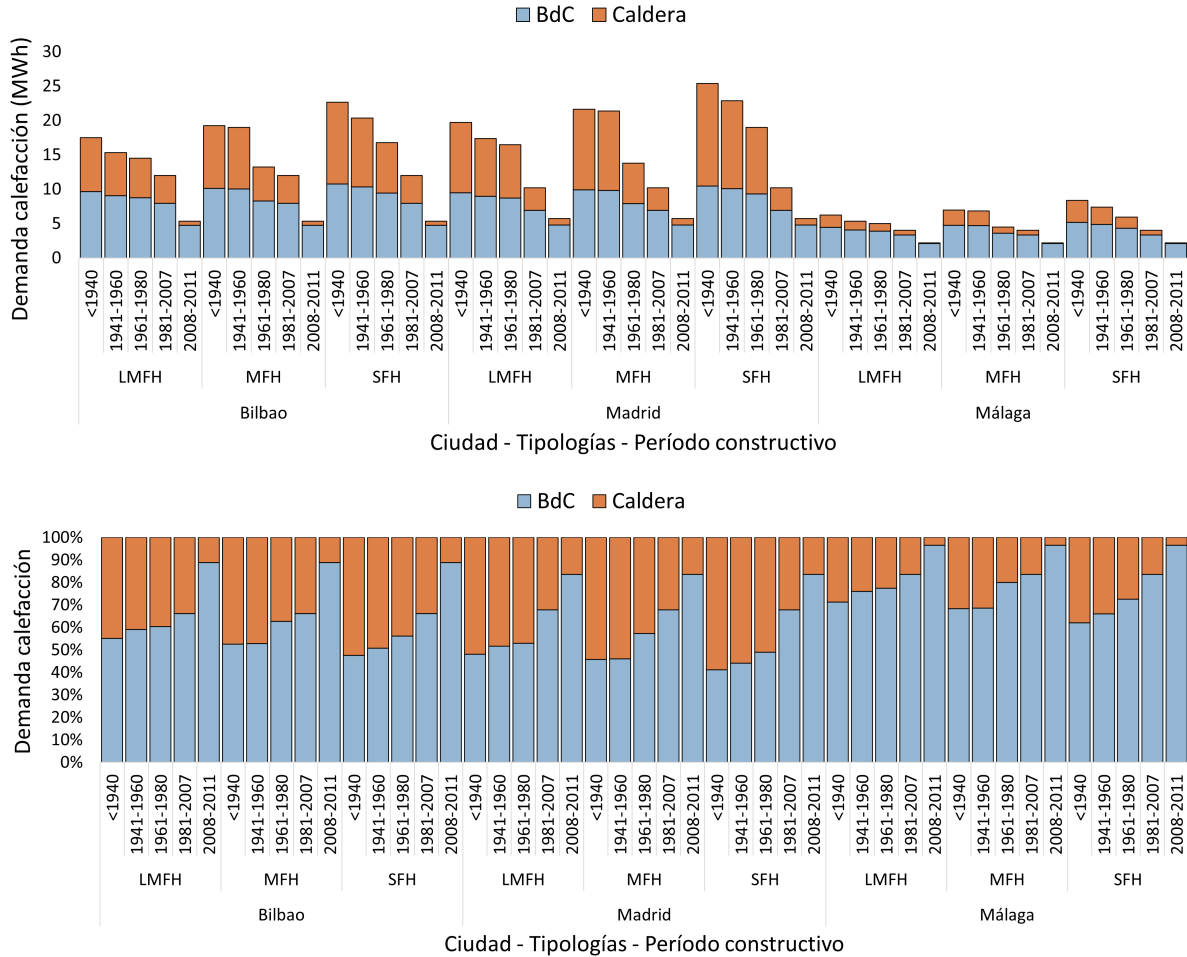


**Figura 7.1.** Horas anuales de funcionamiento por sistema según zona, tipología y período constructivo

### 7.1.2. Cobertura de la demanda de calefacción.

Esta sección analiza la contribución energética efectiva del sistema híbrido, cuantificando qué parte de la demanda térmica es cubierta por la bomba de calor y cuánta requiere apoyo de la caldera, tanto

en términos absolutos como porcentuales. A diferencia del apartado anterior, este enfoque no se centra en el tiempo de funcionamiento, sino en la energía realmente aportada por cada sistema. La Figura 7.2 representa estos resultados.



**Figura 7.2.** Cobertura térmica de la bomba de calor y la caldera según zona, tipología y período constructivo

Al observar los resultados en términos absolutos (MWh), se aprecia una reducción notable de la demanda total en edificaciones más recientes, especialmente a partir de 1980, fruto de la mejora progresiva de la envolvente térmica. También destaca la diferencia entre ciudades con inviernos más fríos como Madrid y Bilbao, donde la demanda de calefacción supera los 20 MWh anuales en viviendas como las unifamiliares (SFH) cuyo período constructivo es anterior a 1940, mientras que en Málaga, incluso en edificios antiguos, rara vez se superan los 5 MWh.

En cuanto al reparto de esa demanda entre sistemas, la bomba de calor cubre la mayor parte en casi todos los casos, aunque su protagonismo varía según las condiciones climáticas y constructivas. La representación porcentual de la Figura 7.2 permite visualizar de forma más clara este reparto. Un ejemplo que evidencia la menor carga térmica y una mayor eficiencia del sistema, gracias a la evolución de la envolvente con el paso del tiempo, es el contraste entre los edificios de la ciudad de Madrid construidos antes de 1940, donde la bomba no llega a cubrir el 50 % de la demanda total, mientras que en edificios

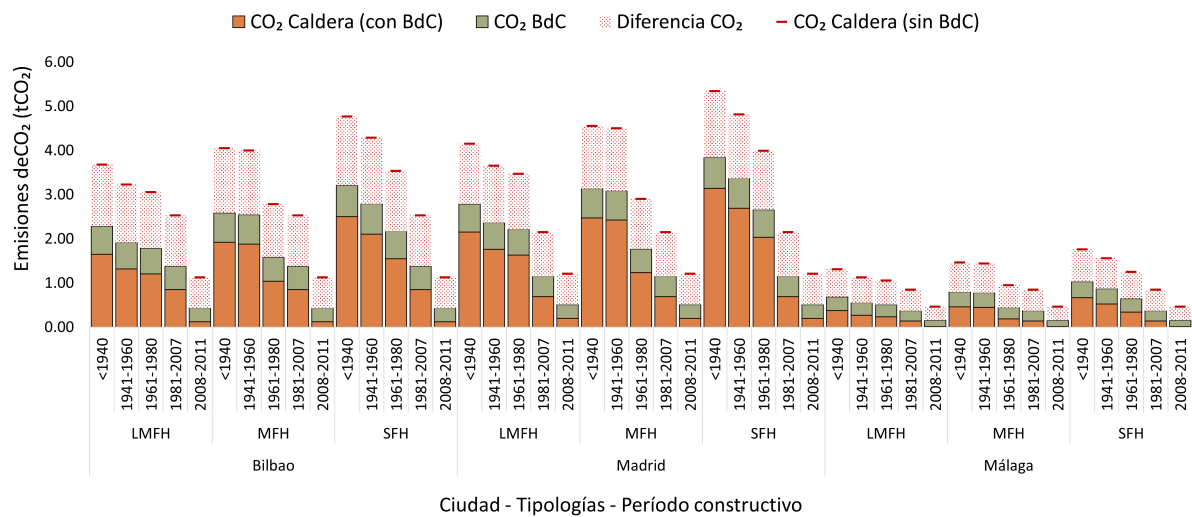
recientes se alcanzan valores superiores al 80 %.

Cabe destacar el caso de Málaga, ciudad en la que se obtienen los mejores resultados: en todas las tipologías con periodo constructivo entre 2008 y 2011, la bomba de calor supera el 90 % de cobertura.

En definitiva, el clima y la calidad constructiva marcan el límite real del protagonismo que puede asumir la bomba de calor en cada vivienda.

### 7.1.3. Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>

En este apartado se analiza el impacto ambiental derivado de la incorporación de la bomba de calor al sistema térmico original. Este análisis es clave para poder evaluar la mejora de la implementación en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Los resultados se muestran en la Figura 7.3.



**Figura 7.3.** Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> según zona, tipología y período constructivo

La figura distingue entre emisiones asociadas a la bomba de calor, las correspondientes a la caldera dentro del sistema híbrido y las que se habrían generado si solo se utilizara la caldera para cubrir toda la demanda. La zona punteada representa la reducción conseguida respecto al escenario original sin bomba de calor.

Tal y como se observa, en todas las ciudades se produce una disminución significativa de las emisiones. Un ejemplo ilustrativo es de un edificio unifamiliar (SFH) anterior a 1940 en Madrid: las emisiones del sistema base eran de 5.34 tCO<sub>2</sub>/MWh, mientras que con el sistema híbrido se reducen a 3.84 tCO<sub>2</sub>/MWh. Esto supone una mejora de más de 1.5 tCO<sub>2</sub>/MWh. Esta tendencia se repite en el resto de tipologías, pues una vivienda multifamiliar (MFH) de Bilbao construido entre 1941 y 1960, se pasa de 4.00 a 2.54 tCO<sub>2</sub>/MWh, lo que refleja una reducción importante de más del 35 %.

La mejora en términos absolutos es especialmente notable en los edificios antiguos de las ciudades con climas más fríos, pues su demanda térmica hace que se vea con claridad el efecto positivo de la

sustitución parcial de la caldera por una bomba de calor.

Las mejoras también se mantienen en viviendas más recientes. En edificaciones construidas entre 2008 y 2011, las reducciones relativas de emisiones siguen siendo elevadas. En Bilbao, por ejemplo, una vivienda unifamiliar (SFH) reduce sus emisiones de 1.13 a 0.43 tCO<sub>2</sub>/MWh, lo que supone una disminución de casi un 62 %. En Madrid, la reducción es similar, pasando de 1.21 a 0.51 tCO<sub>2</sub>/MWh, mientras que en Málaga, con un punto de partida más bajo, las emisiones descienden de 0.46 a 0.16 tCO<sub>2</sub>/MWh, logrando así una mejora del 65 %.

Aunque las emisiones absolutas en Málaga son siempre las más bajas —debido a su menor demanda térmica—, sus reducciones relativas son igualmente significativas. En una LMFH anterior a 1940, las emisiones se reducen de 1.31 a 0.69 tCO<sub>2</sub>/MWh, un 47 %, y esta tendencia se repite en todas las tipologías y periodos constructivos. Esto demuestra que, incluso en climas cálidos, la bomba de calor tiene resultados positivos sobre el medio ambiente.

#### 7.1.4. Análisis según periodo constructivo

El periodo constructivo se revela como uno de los factores más determinantes en el comportamiento del sistema híbrido implementado. Para profundizar en este análisis, se ha seleccionado una vivienda tipo LMFH y se comparan sus resultados a lo largo de los distintos periodos edificatorios en las tres ciudades objeto de estudio.

En viviendas anteriores a 1940, la caldera mantiene un uso muy elevado a pesar de la presencia del sistema híbrido: en Madrid supera las 3400 horas anuales, en Bilbao ronda las 3490 y en Málaga se sitúa en torno a 1600. Las emisiones, aunque reducidas respecto al sistema base, se mantienen altas: 2.79 tCO<sub>2</sub>/MWh en Madrid, 2.29 en Bilbao y 0.69 en Málaga.

Entre 1941 y 1960 se aprecia un ligero descenso, aunque las cifras siguen siendo elevadas. Las horas de funcionamiento de la caldera alcanzan aproximadamente las 3200 en Madrid y Bilbao, y 1400 en Málaga. Las emisiones bajan a 2.36 tCO<sub>2</sub>/MWh en Madrid, 1.92 en Bilbao y 0.55 en Málaga.

Durante el periodo 1961–1980, la tendencia a la mejora continúa, aunque con valores todavía cercanos a los anteriores. Las emisiones se sitúan en 2.22 tCO<sub>2</sub>/MWh en Madrid, 1.79 en Bilbao y 0.51 en Málaga. La caldera sigue operando de forma destacada, con más de 3100 horas en Madrid y Bilbao, y 1300 en Málaga.

Entre 1981 y 2007 se produce una mejora notable en el rendimiento del sistema híbrido. La bomba de calor adquiere un mayor protagonismo, cubriendo entre el 70 y el 85 % de la demanda térmica, lo que se traduce en una reducción importante de las emisiones: 1.38 tCO<sub>2</sub>/MWh en Bilbao, 1.15 en Madrid y 0.37 en Málaga. La caldera disminuye su actividad, aunque aún supera las 2000 horas anuales en climas fríos, y permanece por encima de 1000 en Málaga.

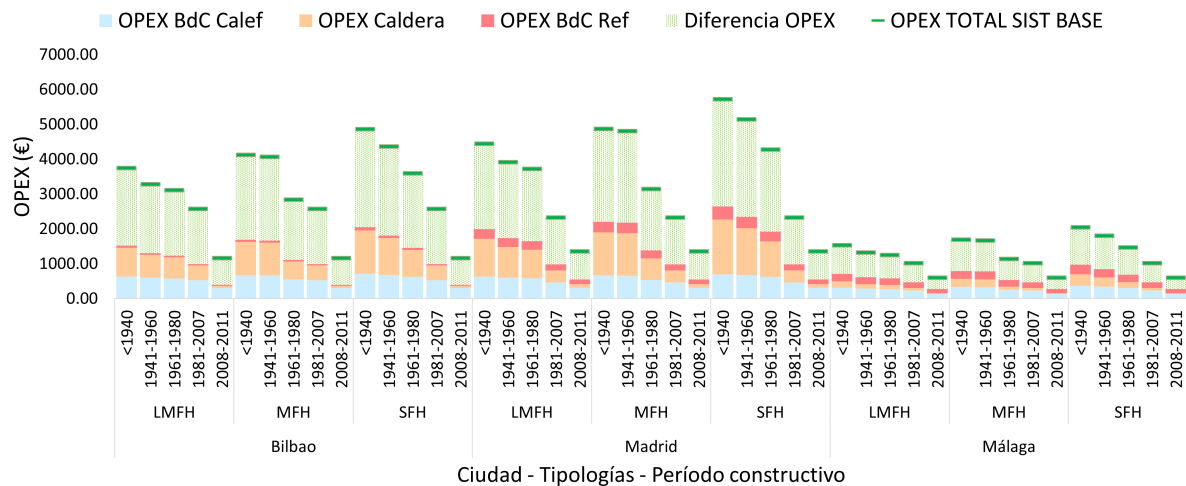
A partir de 2008, el salto en eficiencia es claro. La bomba de calor cubre más del 85 % de la demanda térmica en todas las ciudades, y las emisiones alcanzan sus valores más bajos: 0.51 tCO<sub>2</sub>/MWh en

Madrid, 0.43 en Bilbao y 0.15 en Málaga. La caldera apenas interviene, con 1300 horas en Madrid, 1200 en Bilbao y menos de 350 en Málaga. Esta evolución confirma que la mejora de la envolvente permite optimizar el rendimiento del sistema sin necesidad de intervenciones adicionales.

## 7.2. Evaluación económica

En esta sección se analiza el impacto de la bomba de calor sobre los costes operativos térmicos (OPEX), sin considerar la inversión inicial ni los costes de mantenimiento. El objetivo es evaluar exclusivamente el gasto energético anual asociado al funcionamiento del sistema híbrido.

Este análisis es clave porque demuestra que la incorporación de la bomba de calor no solo reduce las emisiones, sino que también genera un ahorro económico para los usuarios. La Figura 7.4 compara el OPEX del sistema base con la suma del coste operativo de la bomba de calor y la caldera en el sistema híbrido.



**Figura 7.4.** Comparativa del coste operativo (OPEX) con y sin bomba de calor según zona, tipología y período constructivo

En primer lugar, cabe mencionar que los valores elevados de coste operativo obtenidos se deben a que la modelización se ha realizado bajo un perfil de demanda térmica con muchas horas de funcionamiento y elevadas ganancias internas.

Como se puede observar en el gráfico 7.4, las reducciones del coste operativo son relevantes en todas las ciudades. El mayor ahorro, en términos relativos, se registra en la ciudad de Bilbao, en viviendas unifamiliares (SFH) y multifamiliares grandes (LMFH) de construcción reciente, donde los costes se reducen hasta en un 66 %. Incluso en la vivienda unifamiliar (SFH) de Málaga construida antes de 1940 —el caso con menores ahorros— se observa una disminución significativa, superior al 50 %.

Bilbao es la ciudad con la mayor reducción de costes. Todas las tipologías de vivienda presentan un ahorro en torno al 60 % en los edificios más antiguos, y del 66 % en los más recientes. Esto se

explica porque en esta ciudad la demanda de calefacción es mayor que la de refrigeración, de modo que la sustitución del funcionamiento exclusivo de la caldera conlleva una reducción considerable de los costes.

En cuanto a Madrid, que presenta resultados intermedios, los ahorros no bajan en ningún caso del 54 %, y llegan a alcanzar casi el 60 % en edificios antiguos, donde el uso de la caldera es más intensivo.

Aunque las emisiones absolutas en Málaga son siempre las más bajas —debido a su reducida demanda térmica—, sus reducciones relativas también son destacables. En viviendas construidas entre 1961 y 1980, las emisiones se reducen entre un 53 % y un 54 % en todas las tipologías, y esta tendencia se mantiene en el resto de periodos constructivos. Esto demuestra que, incluso en climas cálidos, la bomba de calor ofrece resultados positivos para el medio ambiente.

## 8 | Conclusiones

### Conclusiones

La Unión Europea se ha marcado como objetivo alcanzar la neutralidad climática en 2050, lo que implica una transformación profunda del modelo energético de los Estados Miembros. Una de las estrategias clave para lograrlo es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el parque edificatorio, mediante la disminución del uso de sistemas de calefacción basados en combustibles fósiles. Esta necesidad se ha intensificado con la aprobación del plan *REPowerEU* en 2022, que busca reducir drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles rusos mucho antes de 2030 [4]. En este contexto, la progresiva electrificación del parque residencial —a través de tecnologías como las bombas de calor— se consolida como una solución esencial para avanzar hacia un sistema energético más limpio, resiliente y alineado con los objetivos europeos de descarbonización.

Los resultados obtenidos confirman que la electrificación térmica mediante bombas de calor puede aplicarse con éxito incluso manteniendo la instalación térmica existente, sin necesidad de sustituir radiadores ni modificar el sistema hidráulico. A pesar de esta limitación, la tecnología ha demostrado ser capaz de reducir significativamente el consumo energético, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el coste operativo, lo que refuerza su viabilidad como solución eficaz y realista para el parque residencial español.

El grado de cobertura de la demanda térmica varía según la zona climática, la tipología edificatoria y el año constructivo. En climas cálidos como el de Málaga, se alcanzan niveles de cobertura entre el 60 % (en viviendas anteriores a 1940) y el 90 % (en viviendas nuevas). En ciudades con climas fríos, como Bilbao, la bomba de calor requiere mayor apoyo de la caldera, reduciendo su cobertura a valores entre el 40 % y el 85 %. En climas intermedios como el de Madrid, también ha sido necesario un cierto grado de apoyo, si bien se han registrado coberturas del 65 % al 85 %, especialmente en viviendas unifamiliares. En conjunto, se confirma que la bomba de calor puede cubrir entre el 40 % y el 90 % de la demanda térmica anual en la mayoría de combinaciones analizadas, consolidándose como una tecnología viable en prácticamente todo el territorio nacional.

El periodo constructivo del edificio es igualmente determinante. En edificaciones recientes, construidas conforme al CTE, las bombas de calor han logrado cubrir más del 85 % de la demanda térmica anual, sin necesidad de mejorar la envolvente. Por ejemplo, en viviendas unifamiliares construidas a partir de 2008, se ha alcanzado una cobertura del 88 % en Málaga, del 87 % en Madrid y del 85 % en Bilbao. Por

el contrario, en edificios anteriores a 1960, las coberturas se reducen a entre el 40 % y el 55 %, lo que obliga a mantener el uso de la caldera como sistema de apoyo. Para lograr una electrificación total en el parque edificatorio más envejecido, será necesario actuar sobre la envolvente térmica.

Desde el punto de vista económico, todas las combinaciones estudiadas presentan una reducción significativa en el coste operativo térmico (OPEX). En viviendas unifamiliares construidas antes de 1940, los ahorros relativos alcanzan hasta un 60 % en Madrid, un 66 % en Bilbao y más del 50 % en Málaga. Estos valores, aunque ligeramente inferiores en edificaciones más recientes, se mantienen elevados en todas las ciudades y tipologías analizadas. Esta diferencia se debe al mayor uso del sistema en modo refrigeración durante los meses cálidos. Esto se debe a que las envolventes de nueva construcción están diseñadas para conservar el calor, lo que dificulta su disipación en verano y eleva la demanda de refrigeración. Aun así, el balance energético anual sigue siendo favorable, lo que reafirma la rentabilidad del sistema híbrido en términos económicos, incluso en climas cálidos y edificaciones eficientes.

Este enfoque de sustitución tecnológica adquiere especial relevancia al considerar que una gran parte del parque edificatorio español fue construido entre 1960 y 1980, antes de la existencia de normativa térmica. Aunque las bombas de calor no alcanzan en estos casos el rendimiento observado en edificios recientes, se consiguen reducciones de emisiones de entre el 30 % y el 50 % respecto a los sistemas basados exclusivamente en caldera de gas. Esto pone de manifiesto el potencial de mitigación climática que puede lograrse incluso sin rehabilitaciones integrales, posicionando la electrificación térmica como un primer paso eficaz y accesible hacia la descarbonización.

La relevancia de estos resultados se multiplica al considerar su aplicación a gran escala. La extensión del sistema híbrido al conjunto del parque residencial podría evitar la elevada cantidad de emisión de CO<sub>2</sub> cada año. Esta magnitud de impacto refuerza la necesidad de políticas públicas ambiciosas, centradas en la sustitución progresiva de calderas y en el impulso a tecnologías de alta eficiencia como las bombas de calor.

En conjunto, los resultados del presente estudio permiten desmontar una de las creencias más extendidas sobre las bombas de calor: que solo son eficaces en climas cálidos. Se ha demostrado que, incluso conservando el sistema original de radiadores y sin modificar la envolvente, esta tecnología puede cubrir buena parte de la demanda térmica anual y reducir de forma significativa las emisiones de CO<sub>2</sub>. Su efectividad se mantiene en todas las zonas climáticas analizadas, incluyendo entornos fríos como Bilbao. Por tanto, la electrificación mediante bombas de calor no solo es técnicamente viable, sino también una estrategia eficaz, escalable y realista para avanzar hacia la descarbonización del parque residencial español.

## 9 | Anexos

A continuación, se incluyen los códigos desarrollados para la realización del modelo. Se han dividido en dos documentos en función de su propósito:

- **funciones\_modelo\_tfg.py**

Archivo en formato `.py` que contiene las funciones auxiliares utilizadas para el cálculo de irradiancia, demanda térmica del sistema y funcionamiento de los sistemas generadores (bomba de calor en calefacción y refrigeración, y caldera de gas), así como el dimensionamiento de los radiadores y la determinación de la temperatura de impulsión necesaria para alcanzar las condiciones de confort. Estas funciones están estructuradas de forma modular y son llamadas desde el script principal.

- **simulacion\_resultados\_tfg.ipynb**

Cuaderno Jupyter (`.ipynb`) que actúa como script principal. Desde este archivo se cargan los datos, se ejecutan las funciones desarrolladas y se generan los resultados del análisis. Debido al formato interactivo del cuaderno, la visualización en PDF difiere del archivo anterior.

Ambos archivos se presentan a continuación en formato PDF:

~\OneDrive - Universidad de Málaga\Juan Pablo Jimenez Navarro's files - 06 Beatriz Toledano Martínez\funciones\_modelo\_tfg.py

```

1 import pandas as pd
2 import datetime
3 import solarpy as sp
4 import numpy as np
5 from datetime import datetime
6 import pytz
7 import math
8
9 ### _____LOAD_DATA_____ -
10
11 def load_climatic_data():
12
13     zonas = ['A3', 'A4', 'B3', 'B4', 'C1', 'C2', 'C3', 'C4', 'D1', 'D2', 'D3', 'E1']
14
15     climate = pd.DataFrame()
16     for i in zonas:
17         file = "./database2022/zona"+str(i)+".met"
18         data = data = pd.read_csv(file, sep="\\s+", comment='!', skiprows=2, header=None,
19                                 skip_blank_lines=True, engine='python')
20         data.columns = ['Mes', 'Día', 'Hora', 'Dry Bulb Temp
21 (°C)', 'Tsky', 'Idirecta_horizontal', 'Idifusa_horizontal', 'w', 'HR', 'v_wind', 'dir_wind', 'azimut', 'zenit']
22         data['Global Horiz Radiation (Wh/m2)'] = data['Idirecta_horizontal'] +
23 data['Idifusa_horizontal']
24         data['zona_clima'] = i
25
26         time_series = pd.date_range(start = "2023-01-01 00:00:00 ",end = "2023-12-31 23:00:00", freq =
27 '1h')
28
29         data['datetime'] = pd.to_datetime(time_series)
30         data['WeekofYear'] = data['datetime'].dt.isocalendar().week
31         data['DayofYear'] = data['datetime'].dt.dayofyear
32
33         #data.set_index(data['datetime'],inplace=True)
34
35         climate = pd.concat([climate,data])
36
37         climate = climate[['datetime', 'Dry Bulb Temp (°C)', 'Global Horiz Radiation
38 (Wh/m2)', 'zona_clima', 'WeekofYear', 'DayofYear']]
39         climate.set_index('zona_clima', append=True, inplace=True)
40         climate = climate.unstack('zona_clima')
41         return climate
42
43 def get_city_climate(ciudad, climate):
44
45     city_zone = {
46         "Albacete": "D3", "Alicante": "B4", "Almería": "A4", "Avila": "E1",
47         "Badajoz": "C4", "Barcelona": "C2", "Bilbao": "C1", "Burgos": "E1",
48         "Cáceres": "C4", "Cádiz": "A3", "Castellón": "B3", "Ceuta": "B3",
49         "Ciudad Real": "D3", "Córdoba": "B4", "Coruña": "C1", "Cuenca": "D2",
50         "Donostia": "C1", "Girona": "C2", "Granada": "C3", "Guadalajara": "D3",
51         "Huelva": "B4", "Huesca": "D2", "Jaén": "C4", "León": "E1", "Lleida": "D3",
52         "Logroño": "D2", "Lugo": "D1", "Madrid": "D3", "Málaga": "A3", "Melilla": "A3",
53         "Murcia": "B3", "Ourense": "C2", "Oviedo": "C1", "Palencia": "D1",
54         "Mallorca": "B3", "Las Palmas": "A3", "Pamplona": "D1", "Pontevedra": "C1",
55         "Salamanca": "D2", "Tenerife": "A3", "Santander": "C1", "Segovia": "D2",
56         "Sevilla": "B4", "Soria": "E1", "Tarragona": "B3", "Teruel": "D2",

```

```

53     "Toledo": "C4", "Valencia": "B3", "Valladolid": "D2", "Vitoria": "D1",
54     "Zamora": "D2", "Zaragoza": "D3"
55 }
56
57 zona_climatica = city_zone[ciudad]
58
59 return climate.xls(zona_climatica, level=1, axis=1)
60
61 def get_uvalues(ciudad,tipologia,anio,file="UValues.xlsx"):
62
63     # Leer fichero con los valores de U
64     #Hojas que quiero leer
65     sheets = ["U-MUROS", "U-CUBIERTAS", "U-SUELOS", "U-HUECOS" ]
66
67     #Mirar cuando tenga hueco para optimizare este codigo, creo que podría funcionar con un bucle
68     df_U_m = pd.read_excel(file, sheet_name="U-MUROS", header=[0, 2])
69     df_U_m = df_U_m.loc[:, df_U_m.columns.get_level_values(1) != "Zona climática"]
70     df_U_c = pd.read_excel(file, sheet_name="U-CUBIERTAS", header=[0, 2])
71     df_U_c = df_U_c.loc[:, df_U_c.columns.get_level_values(1) != "Zona climática"]
72     df_U_s = pd.read_excel(file, sheet_name="U-SUELOS", header=[0, 2])
73     df_U_s = df_U_s.loc[:, df_U_s.columns.get_level_values(1) != "Zona climática"]
74     df_U_h = pd.read_excel(file, sheet_name="U-HUECOS", header=[0, 2])
75     df_U_h = df_U_h.loc[:, df_U_h.columns.get_level_values(1) != "Zona climática"]
76
77     df_U_m = df_U_m.head(len(df_U_m) - 5)
78     df_U_c = df_U_c.head(len(df_U_c) - 5)
79     df_U_s = df_U_s.head(len(df_U_s) - 5)
80     df_U_h = df_U_h.head(len(df_U_h) - 5)
81
82     df_U_m.set_index(df_U_m.columns[0], inplace=True) #Establecemos la primera columna del DataFrame
como índice
83     df_U_c.set_index(df_U_c.columns[0], inplace=True) #Establecemos la primera columna del DataFrame
como índice
84     df_U_s.set_index(df_U_s.columns[0], inplace=True) #Establecemos la primera columna del DataFrame
como índice
85     df_U_h.set_index(df_U_h.columns[0], inplace=True) #Establecemos la primera columna del DataFrame
como índice
86
87
88     # Extraer los U-values de cada hoja
89     U_m = df_U_m.loc[ciudad, (tipologia, anio)]
90     U_c = df_U_c.loc[ciudad, (tipologia, anio)]
91     U_s = df_U_s.loc[ciudad, (tipologia, anio)]
92     U_h = df_U_h.loc[ciudad, (tipologia, anio)]
93
94     return U_m, U_c, U_s, U_h
95
96 def get_geografia(ciudad):
97
98     data = pd.read_excel('Coordenadas_ciudades.xlsx')
99     latitud = data[data.Ciudad==ciudad]['Latitud']
100    altitud = data[data.Ciudad==ciudad]['Altitud']
101
102    return latitud.item(),altitud.item()
103
104    ### _____ CALCULATIONS_DEMAND _____


---


105
106 # 1. Función para obtener la radiación en diferentes superficies
107 def obtener_radiacion.fecha, hora, lat, h):

```

```

108 # Definición de las normales para cada superficie
109 vnorm_east = np.array([0, 1, 0]) # Este
110 vnorm_west = np.array([0, -1, 0]) # Oeste
111 vnorm_north = np.array([1, 0, 0]) # Norte
112 vnorm_south = np.array([-1, 0, 0]) # Sur
113 vnorm_roof = np.array([0, 0, 1]) # Cubierta
114
115 # Ajuste de hora según la zona horaria (UTC+1 en invierno, UTC+2 en verano)
116 tz = pytz.timezone('Europe/Madrid')
117 # Localizar la fecha según la zona horaria y manejar excepciones para horas no existentes
118 try:
119     fecha_con_zona = tz.localize(fecha, is_dst=None) # Localizar la fecha
120 except pytz.NonExistentTimeError:
121     # En caso de hora inexistente, ajustamos la hora
122     fecha_con_zona = tz.localize(fecha.replace(hour=hora + 1), is_dst=True)
123
124 hora_ajustada = fecha_con_zona.hour # Obtener la hora local ajustada
125
126 # Cálculo de las irradiancias para cada superficie
127 G_roof = sp.beam_irradiance(hora_ajustada, fecha, lat)
128 G_east = sp.irradiance_on_plane(vnorm_east, hora_ajustada, fecha, lat)
129 G_west = sp.irradiance_on_plane(vnorm_west, hora_ajustada, fecha, lat)
130 G_north = sp.irradiance_on_plane(vnorm_north, hora_ajustada, fecha, lat)
131 G_south = sp.irradiance_on_plane(vnorm_south, hora_ajustada, fecha, lat)
132
133 return G_roof, G_east, G_west, G_north, G_south
134
135 # 2. Función para calcular las irradiaciones para todo el año (8760 horas)
136 def calcular_radiaciones(params):
137     # Crear un DataFrame con las fechas de todo el año (8760 horas)
138     df = pd.DataFrame({'datetime': pd.date_range(start='2023-01-01', periods=8760, freq='h')})
139
140     # Obtener la altitud y latitud de los parámetros
141     h = params['altitud']
142     lat = params['latitud']
143
144     # Función para aplicar en cada fila
145     def calcular_row(row):
146         fecha = row['datetime']
147         hora = row['datetime'].hour
148         # Obtener las irradiaciones para esta fecha y hora
149         G_roof, G_east, G_west, G_north, G_south = obtener_radiacion(fecha, hora, lat, h)
150         # Retornar las irradiaciones como valores float
151         return pd.Series({
152             'G_roof': float(G_roof),
153             'G_east': float(G_east),
154             'G_west': float(G_west),
155             'G_north': float(G_north),
156             'G_south': float(G_south)
157         })
158
159     # Aplicar la función a cada fila del DataFrame
160     df[['G_roof', 'G_east', 'G_west', 'G_north', 'G_south']] = df.apply(calcular_row, axis=1)
161
162     return df
163
164 # 3. Función para calcular las ganancias y pérdidas de energía (vectorizado)
165 def calculo_demanda(df_clima, Uvalues, params, ciudad):
166     # Obtener las irradiaciones para todo el año

```

```

167     df = calcular_radiaciones(params)
168
169     # Desempaquetar Uvalues
170     U_roof = Uvalues[1]
171     U_north_wall = U_south_wall = U_east_wall = U_west_wall = Uvalues[0]
172
173     # Función para calcular las ganancias solares, internas y pérdidas de energía
174     def calcular_energia_fila(row):
175         hora = row['datetime'].hour
176         fecha = row['datetime'].date()
177
178         # Perfiles horarios
179         people_profile = 1 if hora < 8 or hora > 16 else 0
180         lighting_profile = 1 if people_profile == 1 and (6 <= hora <= 9 or 18 <= hora <= 23) else 0
181         appliances_profile = 1 if hora in [8, 9] or hora >= 18 else 0
182
183         # Calcular ganancias solares
184         G_roof, G_east, G_west, G_north, G_south = row[['G_roof', 'G_east', 'G_west', 'G_north',
185 'G_south']]
186         solar = (params['F_sh'] * (1 - params['F_f']) * params['F_w'] * params['G_gln'] *
187                 (params['A_north_window'] * G_north + params['A_south_window'] * G_south +
188                 params['A_east_window'] * G_east + params['A_west_window'] * G_west)) + \
189                 (params['F_ob'] * params['a_op'] * params['R_se'] *
190                 (U_roof * params['A_roof'] * G_roof + U_north_wall * params['A_north_wall'] * G_north
191 +
192                 U_south_wall * params['A_south_wall'] * G_south + U_east_wall *
193 params['A_east_wall'] * G_east +
194                 U_west_wall * params['A_west_wall'] * G_west))
195
196         # Ganancias internas
197         int_gains = people_profile * params['People_power'] + lighting_profile *
198 params['Lighting_power'] + appliances_profile * params['Appliances_power']
199
200         T_ext = df_clima.loc[row.name, "Dry Bulb Temp (°C)"] # Acceso correcto a la columna
201
202         # Retornar ganancias, pérdidas y la temperatura del aire seco
203         return pd.Series({
204             'Solar Gains': solar,
205             'Internal Gains': int_gains,
206             'Gains': solar + int_gains,
207             'T_ext': T_ext # Incluimos la temperatura del aire seco
208         })
209
210     # Aplicar la función de manera vectorizada
211     df[['Solar Gains', 'Internal Gains', 'Gains', 'T_ext']] = df.apply(calcular_energia_fila, axis=1)
212
213     # Calcular la temperatura interna y el balance térmico
214     n = len(df)
215     temp_int = np.zeros(n)
216     balance = np.zeros(n)
217     ventilacion = np.zeros(n)
218     conduccion = np.zeros(n)
219     radiacion = np.zeros(n)
220     losses = np.zeros(n)
221     evolucion_libre_t = np.zeros(n)
222
223     temp_int[0] = params['T_inicial'] # Temperatura inicial
224     evolucion_libre_t[0] = params['T_inicial']
225     losses[0] = 0
226     # Realizamos el cálculo para cada hora

```

```

223     for i in range(1, n):
224
225         T_ext = df.loc[i-1, "T_ext"]
226         gains = df.loc[i - 1, "Gains"]
227
228         # Calcular pérdidas de energía
229         vent = params['n_air'] * params['V'] * params['Cp'] * (temp_int[i-1] - T_ext)
230
231         cond = (params['A_roof'] * U_roof * params['bi'] +
232                params['A_north_wall'] * U_north_wall * params['bi'] +
233                params['A_south_wall'] * U_south_wall * params['bi'] +
234                params['A_east_wall'] * U_east_wall * params['bi'] +
235                params['A_west_wall'] * U_west_wall * params['bi']) * (temp_int[i-1] - T_ext)
236
237         rad = 3 * params['T_sky'] * params['h_re']
238
239         losses[i] = vent + cond + rad
240         ventilacion[i] = vent
241         conducción[i] = cond
242         radiacion[i] = rad
243
244         temp_int[i] = temp_int[i-1] + 1 / (params['Cb'] * params['A_roof']) * (df.loc[i-1, "Gains"]-
losses[i-1])
245         evolucion_libre_t[i] = temp_int[i]
246         #print(f"Temperatura interior: {temp_interior:.2f}°C")
247         # Limitar la temperatura dentro del rango 21-26 °C
248
249         hora_actual = df.loc[i, 'datetime'].hour
250         #people_present = 1 if hora_actual < 8 or hora_actual > 16 else 0
251
252         if temp_int[i] < 21:
253             balance[i] = losses[i-1] - df.loc[i-1, "Gains"] + (params['Cb'] * params['A_roof']) * (21
- temp_int[i-1])
254             temp_int[i] = 21
255
256         elif temp_int[i] > 26:
257             balance[i] = losses[i-1] - df.loc[i-1, "Gains"] + (params['Cb'] * params['A_roof']) * (26
- temp_int[i-1])
258             temp_int[i] = 26
259
260         else:
261             balance[i] = 0
262
263         #print(f"Temperatura en hora {i}: {temp_int[i]:.2f}°C, Balance térmico: {balance[i]:.2f}")
264
265         # Agregar la temperatura interior y el balance térmico al DataFrame
266         df.loc[:, "Temp_Interior"] = temp_int
267         df.loc[:, "Evolucion libre temperatura"] = evolucion_libre_t
268         df.loc[:, "Balance"] = balance
269         df.loc[:, "Ventilación"] = ventilacion
270         df.loc[:, "Conducción"] = conducción
271         df.loc[:, "Radiación"] = radiacion
272         df.loc[:, "Qheating"] = df["Balance"].clip(lower=0)
273         df.loc[:, "Qcooling"] = (-df["Balance"]).clip(lower=0)
274
275         df['Month_Number'] = df['datetime'].dt.month
276         df['WeekofYear'] = df['datetime'].dt.isocalendar().week
277
278         # Resumen
279         total_Qheat = df["Qheating"].sum()/1000

```

```

280     total_Qcool = df["Qcooling"].sum()/1000
281
282     max_Qheat = df["Qheating"].max()/1000
283     fila_Qheat = df.loc[df["Qheating"].idxmax(), "datetime"]
284     max_Qcool = df["Qcooling"].max()/1000
285     fila_Qcool = df.loc[df["Qcooling"].idxmax(), "datetime"]
286
287     print(f""Resumen demanda energía para edificio ubicado en {ciudad}:
288     Demanda de calefacción: {total_Qheat:.2f} kWh/año
289     Demanda pico de calefacción: {max_Qheat:.2f} kW
290     Día demanda pico calefacción: {fila_Qheat}
291
292     Demanda de refrigeración: {total_Qcool:.2f} kWh/año
293     Demanda pico de refrigeración: {max_Qcool:.2f} kW
294     Día demanda pico refrigeración: {fila_Qcool}
295     """)
296
297     return df, total_Qheat, total_Qcool
298
299
300 ##### PLOTTING #####
301
302 def plot_mensual(df):
303     import matplotlib.pyplot as plt
304     import seaborn as sns
305
306     # Optional: set a Seaborn theme
307     sns.set_theme()
308     sns.color_palette("pastel")
309
310     # Define colors
311     colors = ['#FF7F7F', '#7FBFFF'] # Light Red and Light Blue
312
313     # Step 1: Group and aggregate
314     monthly_data = df.groupby('Month_Number')[['Qheating', 'Qcooling']].sum().sort_index()
315
316     # Step 2: Prepare data
317     x = monthly_data.index
318     heating = monthly_data['Qheating']/1000
319     cooling = monthly_data['Qcooling']/1000
320
321     # Step 3: Plot
322     plt.figure(figsize=(10, 6))
323     plt.bar(x, heating, label='Qheating',color=colors[0])
324     plt.bar(x, cooling, bottom=heating, label='Qcooling',color=colors[1])
325
326     plt.title('Monthly Thermal Demand')
327     plt.xlabel('Month')
328     plt.ylabel('Energy (kWh)') # or whatever your unit is
329     plt.xticks(x)
330     plt.legend()
331     plt.tight_layout()
332     plt.show()
333
334
335
336 ##### CALCULATIONS_RADIATORS #####
337

```

```

338 def calcular_radiadores(df, params_rad):
339
340     df = df[0]
341
342     # Cálculo del salto térmico (UNE-EN 442)
343     T_m1 = (params_rad['T_sup1'] + params_rad['T_ret1']) / 2
344     delta_T1 = params_rad['T_sup1'] - params_rad['T_ret1']
345
346     # Cálculo de la potencia térmica disipada
347     Fi1 = params_rad['Km'] * ((params_rad['T_sup1'] + params_rad['T_ret1'])/2 -
params_rad['T_room'])**params_rad['n_r']
348
349     # Cálculo de número de placas por radiador
350     df['n_placas'] = math.ceil(df['Qheating'].max() / Fi1)
351
352     # Cálculo de la potencia térmica real
353     df['Q_rad_real'] = df['n_placas'] * Fi1
354
355     # Cálculo vectorizado para solo las filas con demanda de calefacción
356     df["Tsup2"] = 0 # Inicializamos la columna para evitar errores
357
358     # Aplicar solo a las filas donde hay demanda de calefacción
359     df['Qheating_nonzero'] = np.where(df['Qheating'] > 0, df['Qheating'], 0)
360
361     df['delta_T2'] = delta_T1 * (df['Qheating_nonzero'] / df['Q_rad_real'])**(1 / params_rad['n_r'])
362
363     df['Tsup2'] = df['delta_T2']/2 + params_rad['T_room'] + (
364         (params_rad['T_sup1'] - delta_T1 / 2 - params_rad['T_room']) /
365         (df['Q_rad_real'] / (df["Qheating_nonzero"]+0.0000001)**(1 / params_rad['n_r'])))
366
367     del df["Qheating_nonzero"]
368
369     # Retorna el DataFrame actualizado
370     return df
371
372
373 ### _____ HEAT_PUMP_PARAMETERS _____ -
374
375 def parametros_bomba(df):
376     params_bomb = {
377         #Heating coefficients
378         'a_h': 9.794336687, 'b_h': -0.243936045, 'c_h': 0.001814978, 'd_h': 0.292621885, 'e_h':
0.002104749, 'f_h': -0.004500915,
379         #Cooling coefficients
380         'a_c': 8.297341965, 'b_c': 0.135297467, 'c_c': 0.002869829, 'd_c': -0.26492478, 'e_c':
0.003052294, 'f_c': -0.002215586,
381         #Otros parámetros
382         'Cc':0.9,
383         'Timp' : 18
384     }
385     return params_bomb
386
387
388 ### _____ CALCULATIONS_HEATING_SYSTEMS _____ -
389
390 #Cálculo de le energía eléctrica necesaria a usar por la bomba
391 def calcular_elec(df, params_bomb, climate):
392     #Inicialización de la columna

```

```

393     df["Qelec"] = 0
394
395     #Cálculo de la deamnda de calefacción
396     df["bomba_th"] = np.where(df["Tsup2"]>55,df["Qheating"*((55-21)/(df["Tsup2"] -
21)),df["Qheating"])
397
398     #Cálculo de la potencia térmica auxiliar
399     df["Qaux"] = np.where(df["Tsup2"] > 55, df["Qheating"] - df["bomba_th"] , 0)
400
401     #Cálculo de la demanda eléctrica con la calefacción
402     df["PLR_heating"] = np.where(df["bomba_th"] > 0, df["bomba_th"] / (df.Qheating - df.Qaux).max(),
0)
403
404     df["Tsup2_max"] = np.where( df["Tsup2"] > 55, 55,
405     np.where((df["Tsup2"] > 0) & (df["Tsup2"] <= 55), df["Tsup2"],0))
406
407     df["COP_th_heating"] = np.where(df["bomba_th"] > 0,
408     params_bomb['a_h'] +
409     params_bomb['b_h'] * df["Tsup2_max"] +
410     params_bomb['c_h'] * df["Tsup2_max"]**2 +
411     params_bomb['d_h'] * climate["Dry Bulb Temp (°C)"].iloc[:,0] +
412     params_bomb['e_h'] * climate["Dry Bulb Temp (°C)"].iloc[:,0]**2 +
413     params_bomb['f_h'] * df["Tsup2_max"] * climate["Dry Bulb Temp (°C)"].iloc[:,0], 0
414     )
415     df["COP_real_heating"] = np.where(
416     df["PLR_heating"] > 0,
417     df["COP_th_heating"] * (df["PLR_heating"] / (df["PLR_heating"] * params_bomb['Cc'] + (1 -
params_bomb['Cc']))),
418     0
419     )
420
421     df["Qelec_h"] = df['bomba_th']/df["COP_real_heating"]
422
423
424     #Cálculo de la demanda eléctrica con la refrigeración
425     df["PLR_cooling"] = np.where(df["Qcooling"] > 0, df["Qcooling"] / df.Qcooling.max(), 0)
426     df["COP_th_cooling"] =np.where ( df["Qcooling"] > 0,
427     params_bomb['a_c'] +
428     params_bomb['b_c'] * params_bomb['Timp'] +
429     params_bomb['c_c'] * params_bomb['Timp']**2 +
430     params_bomb['d_c'] * climate["Dry Bulb Temp (°C)"].iloc[:,0] +
431     params_bomb['e_c'] * climate["Dry Bulb Temp (°C)"].iloc[:,0]**2 +
432     params_bomb['f_c'] * params_bomb['Timp'] * climate["Dry Bulb Temp (°C)"].iloc[:,0], 0
433     )
434     df["COP_real_cooling"] = np.where(
435     df["PLR_cooling"] > 0,
436     df["COP_th_cooling"] * (df["PLR_cooling"] / (df["PLR_cooling"] * params_bomb['Cc'] + (1 -
params_bomb['Cc']))),
437     0
438     )
439     df["Qelec_c"] = np.where(df["Qcooling"] > 0, df["Qcooling"] / df["COP_real_cooling"], 0)
440
441     df["Qelec"] = df["Qelec_c"] + df["Qelec_h"]
442
443     return df
444
445     #Cálculo de le energía eléctrica necesaria a usar por la caldera
446     def calcular_gas(df):
447
448     df["Gas"] = np.where(df["Qaux"] > 0, df["Qaux"]/0.95, 0)

```

```
449
450     return df
451
452
453
454 ###_____CALCULATIONS_BOILER_WITHOUT_HEAT_PUMP_____ -


---


455 #Cálculo de la emisión de CO2 en caso de que no se usase bomba de calor en la calefacción
456 def emisiones_sin_bomba(df):
457
458     df['Gas_sin_bomba'] = np.where(df["Tsup2"] > 0, df["Qheating"]/0.95, 0)
459
460     return df
461
```

```
In [ ]: import pandas as pd
import radiadores_faster_prueba as rad_faster
import importlib
importlib.reload(rad_faster)
from datetime import datetime
import numpy as np
import math
import solarpy as sp
from zoneinfo import ZoneInfo
pd.options.display.float_format = '{:.2f}'.format
```

```
In [ ]: %%time
datos_climaticos = rad_faster.load_climatic_data()
```

```
In [ ]: #Parámetros de simulacion
params = {
    # Parámetros relacionados con Las superficies del edificio
    'A_roof': 100, 'A_floor': 100, 'A_north_wall': 30, 'A_south_wall': 30, 'A_

#Superficies acristaladas
'A_north_window': 5, 'A_south_window': 5, 'A_east_window': 5, 'A_west_window

# Valores de Las propiedades térmicas
'bi': 1, # Factor de irradiancia de La superficie exterior (W/m²·K)
' Cp': 0.34, # Capacidad calorífica del aire (W/m³·K)
' n_air': 0.4, # Coeficiente de renovación de aire (1/hora)
' V': 300, # Volumen del edificio (m³)
' T_inicial': 21, # Temperatura inicial en el interior (°C)

# Factores de operación
' F_ob': 0.5, 'F_ob_north': 1, 'F_ob_south': 0.5, 'F_ob_east': 0.6, 'F_ob_west':

# Parámetros relacionados con Las ganancias internas
' F_sh': 0.8, #reduction factor external shading, horizontal
' F_sv': 0.6, #reduction factor external shading, vertical?
' F_f': 0.3, #is the frame are fraction of the windows
' F_w': 0.9, #reduction factor, considering radiation non-perpendicular to th
' G_gln': 0.85, #total solar energy transmittance for radiation per-perpendicula
' F_ob': 0.5,
' a_op': 0.6,
' R_se': 0.04,

' People_power': 215, # Potencia de calor de Las personas (W)
' Lighting_power': 500, # Potencia de calor de La iluminación (W)
' Appliances_power': 300, # Potencia de calor de Los electrodomésticos (W)

# Parámetros relacionados con La radiación y el cielo
' T_sky': 11, # Temperatura del cielo (°C)
' h_re': 5, # Coeficiente de radiación del cielo

# Parámetros térmicos de almacenamiento de calor
' Cb': 45.0, # Capacidad térmica de La envolvente (Wh/m²) #Valor original 45

' latitud': rad_faster.get_geografia(ciudad)[0],
' altitud': rad_faster.get_geografia(ciudad)[1]}
```

```
In [ ]: #Parámetros de radiadores
params_rad = {
    # Parámetros de catálogo
    'Km': 0.8097, 'n_r': 1.2767, #en el paper pone 1.3 pero he puesto la del cat

    #Definición de temperaturas según UNE-EN 442
    'T_sup1': 75, 'T_ret1': 65, 'T_room': 21}
```

```
In [ ]: #Parámetros costes y factores de emisión
elec_cost = 0.2 #EUR/kWh
gas_cost = 0.1 #EUR/kWh
eta_boiler = 0.95
elec_co2_factor = 0.2
gas_co2_factor = 0.2
```

```
In [ ]: %%time

resultados = []

ciudades = [ "Bilbao", "Madrid", "Málaga" ]
tipologias = ['SFH', 'MFH', 'LMFH']
anios = ['<1940', '1941-1960', '1961-1980', '1981-2007', '2008-2011']

for i in ciudades:
    clima = rad_faster.get_city_climate(i,datos_climaticos)

    for tipologia in tipologias:
        for anio in anios:
            u_values = rad_faster.get_uvalues(i,tipologia,anio)

            df = rad_faster.calculo_demanda(clima, u_values, params, i)

            df = rad_faster.calcular_radiadores(df, params_rad)

            params_bomb = rad_faster.parametros_bomba(df)

            df = rad_faster.calcular_elec(df, params_bomb, datos_climaticos)

            df = rad_faster.calcular_gas(df)

            df = rad_faster.emisiones_sin_bomba(df)

            summary_dict = {'city':i,
                            'typology': tipologia,
                            'año': anio,
                            'ref_total':df.Qcooling.sum()/1000,
                            'ref_peak':df.Qcooling.max()/1000,
                            'cal_total':df.Qheating.sum()/1000,
                            'cal_peak':df.Qheating.max()/1000,
                            'cal_BdC':df.bomba_th.sum()/1000,
                            'cal_boiler':df.Qaux.sum()/1000,
                            'ref_BdR':df.Qcooling.sum()/1000,
                            'elec_BdC':df.Qelec_h.sum()/1000,
                            'elec_BdR':df.Qelec_c.sum()/1000,
                            'cal_peak_elec': df.Qelec_h.max()/1000,
                            'ref_peak_elec': df.Qelec_c.max()/1000,
                            'n_placas': df.n_placas.unique()[0],
```

```
'Nominal_cap_cal_BdC':(df.Qheating - df.Qaux).max()/1000,
'Nominal_cap_ref_BdR':df.Qcooling.max()/1000,
'n_hours_BdC':(df.Qelec_h > 0).sum(),
'n_hours_BdR':(df.Qelec_c > 0).sum(),
'n_hours_boiler':(df.Qaux > 0).sum(),
'COP_mean':(df[df.COP_real_heating > 0]['COP_real_heating']).mea
'BdC_OPEX_cost':(df.Qelec_h + df.Qelec_c).sum()*elec_cost/1000,
'eta_boiler': eta_boiler,
'boiler_OPEX_cost':df.Gas.sum()*gas_cost/1000,
'CO2': df.Gas.sum()*gas_co2_factor/1000 + (df.Qelec_h + df.Qelec
'n_hours_boiler_w/o_heat_pump': (df.Qheating > 0).sum(),
'ref_OPEX_cost': df.Qelec_c.sum()*elec_cost/1000,
'boiler_OPEX_cost_w/o_heat_pump':df.Gas_sin_bomba.sum()*gas_cost
'CO2_w/o_heat_pump': df.Gas_sin_bomba.sum()*gas_co2_factor/1000

}

resultados.append(summary_dict)
```

```
In [ ]: resultados = pd.DataFrame(resultados)
resultados.to_excel("resultados.xlsx", index=False)
```

## 10 | Bibliografía

- [1] European Commission, “In focus: Energy efficiency in buildings,” 17 de feb. de 2020. dirección: [https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17\\_en](https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en).
- [2] ESTAT, “Disaggregated final energy consumption in households,” 2024, [En línea].
- [3] European Commission, “The European Green Deal, COM(2019) 640 final,” 11 de dic. de 2019. dirección: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.
- [4] European Commission, “REPowerEU,” 2022. dirección: [https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu\\_es](https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_es) (visitado 08-06-2024).
- [5] D. Østergaard y S. Svendsen, “Are typical radiators over-dimensioned? An analysis of radiator dimensions in 1645 Danish houses,” *Energy and Buildings*, vol. 178, págs. 206-215, 2018. DOI: [10.1016/j.enbuild.2018.08.027](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.027).
- [6] W. Ljunggren, “Optimum performance of radiator space heating systems connected to achieve low as possible DH return temperature,” 2006.
- [7] I. Pothof, T. Vreeken y M. van Meerkerk, “Field measurements on lower radiator temperatures in existing buildings,” 2022.
- [8] C. C. de Investigación de la Comisión Europea, “Sitio web oficial del Joint Research Centre (JRC),” 2025. dirección: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en).
- [9] J. Roca Reina, A. Toleikyte, J. Volt y J. Carlsson, “Alternatives for upgrading from high-temperature to low-temperature heating systems in existing buildings: Challenges and opportunities,” *Energy and Buildings*, vol. 323, pág. 114 798, 2024, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114798>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824009149>.
- [10] T. A, R. R. JC, V. J et al., “The Heat Pump Wave: Opportunities and Challenges,” n.º KJ-NA-31-565-EN-N (online), KJ-NA-31-565-EN-C (print), 2023, ISSN: 1831-9424 (online), 1018-5593 (print). DOI: [10.2760/27877](https://doi.org/10.2760/27877) (online), [10.2760/327528](https://doi.org/10.2760/327528) (print).
- [11] I. para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Segmentación del parque residencial y agrupación de edificios en clústeres,” 2020. dirección: [https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/planes\\_estartegicos/1\\_2020\\_segmentacion\\_parque\\_residencial\\_clusteres.pdf](https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/planes_estartegicos/1_2020_segmentacion_parque_residencial_clusteres.pdf).

- [12] “Base de datos TABULA y EPISCOPE [online],” dirección: <https://webtool.building-typology.eu/#bm>.
- [13] “Base de datos PVGIS[online],” dirección: [https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/meteo\\_source\\_pvgis.htm](https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/meteo_source_pvgis.htm).
- [14] A. R. G. Y. A. B. F. Joaquim Arcas-Abella Anna Pagès-Ramon, “Aproximación a la demanda energética residencial para calefacción en España,” Diciembre, 2018, Estudio (02) para la ERESEE 2020. Con la colaboración de Dolores Huerta y Estefanía Caamaño Martín. Revisión: Eduardo de Santiago y Enrique Larrumbide.
- [15] “UNE-EN ISO 52016-1:2017. Eficiencia energética de los edificios. Cálculo de las necesidades energéticas de calefacción y refrigeración, temperaturas interiores y carga calorífica y de enfriamiento. Parte 1: Procedimientos de cálculo,” 2017.
- [16] “UNE-EN ISO 6946:2017. Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo (Versión corregida 2021-12),” 2021, Norma española. Publicada en enero de 2021, versión corregida en marzo de 2024. Elaborada por el comité técnico CTN-UNE 92 Aislamiento térmico, con secretaría desempeñada por ANDIMAT.
- [17] J. M. Cejudo López y A. T. E. de Climatización y Refrigeración (ATECYR), “Documentos técnicos de instalaciones en la edificación (DTIE 9-05): Sistemas de climatización,” 2009.
- [18] Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización (AFEC), “La Bomba de Calor. Fundamentos, Tecnología y Casos Prácticos,” 2018.
- [19] “UNE-EN 442-2:2015, Radiadores y convectores. Parte 2: Métodos de ensayo y de evaluación,” 2015, Asociación Española de Normalización.
- [20] Endesa, “Tarifa Libre 12 Meses - Luz,” 2024. dirección: <https://www.endesa.com/es/luz-y-gas/luz/otras-tarifas-luz-endesa/libre-12-meses>.
- [21] Endesa, “Tarifa Gas RL.2 - Oferta Gas Endesa,” 2024. dirección: <https://www.endesa.com/es/luz-y-gas/gas/otras-tarifas-gas-endesa/oferta-gas-endesa-rl2>.
- [22] Generalitat de Catalunya, “Factors d’emissió associats a l’energia,” 2024. dirección: [https://canviclimatic.gencat.cat/en/actua/factors\\_demissio\\_associats\\_a\\_lenergia/](https://canviclimatic.gencat.cat/en/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/).
- [23] European Union, “Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955,” 2023. dirección: [https://www.stradalex.eu/en/se\\_src\\_publ\\_leg\\_eur\\_jo/toc/leg\\_eur\\_jo\\_3\\_20230915\\_228/doc/ojeu\\_2023.228.01.0094.01](https://www.stradalex.eu/en/se_src_publ_leg_eur_jo/toc/leg_eur_jo_3_20230915_228/doc/ojeu_2023.228.01.0094.01).
- [24] F. Li, G. Zheng y Z. Tian, “Optimal operation strategy of the hybrid heating system composed of centrifugal heat pumps and gas boilers,” *Energy and Buildings*, vol. 58, págs. 27-36, 2013, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.044>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812005555>.
- [25] M. Beccali, M. Bonomolo, F. Martorana, P. Catrini y A. Buscemi, “Electrical hybrid heat pumps assisted by natural gas boilers: a review,” *Applied Energy*, vol. 322, pág. 119466, 2022, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119466>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922007930>.

- [26] Y. Sun, Q. Shen, X. Liu et al., “Optimal control strategy for building HVAC systems: Satisfying flexible demand response with different value-based selection,” *Energy and Buildings*, vol. 323, pág. 114 823, 2024, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114823>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824009393>.
- [27] L. Dworatzek, D. Santucci y C. van Treeck, “Assessing the impact of local energy generation and storage to achieve the decarbonization of the single-family housing stock in Germany,” *Energy and Buildings*, vol. 327, pág. 115 068, 2025, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115068>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824011848>.
- [28] E.-J. Sarabia-Escriva, J.-P. Jiménez-Navarro, V.-M. Soto-Francés y J.-M. Pinazo-Ojer, “Assessing the energy performance certification effectiveness for the Spanish building stock in response to recent climate change data,” *Energy and Buildings*, vol. 323, pág. 114 816, 2024, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114816>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824009320>.
- [29] “Critical discussion on the challenges of integrating heat pumps in hydronic systems in existing buildings,” *Energy*, vol. 326, pág. 136 158, 2025, ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136158>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544225018006>.
- [30] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Innovation Landscape for Smart Electrification,” 2024. dirección: <https://www.irena.org/Innovation-landscape-for-smart-electrification>.
- [31] International Renewable Energy Agency (IRENA), “World Energy Transitions Outlook 2024 – Summary for Policymakers,” nov. de 2024. dirección: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA\\_World\\_energy\\_transitions\\_outlook\\_2024\\_Summary.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024_Summary.pdf).
- [32] MyBoiler.com, “Hybrid Heat Pumps,” 2024. dirección: <https://hub.myboiler.com/heat-pumps/hybrid-heat-pumps/>.
- [33] P. Altermatt, J. Clausen, H. Brendel et al., “Replacing gas boilers with heat pumps is the fastest way to cut German gas consumption,” *Communications Earth & Environment*, vol. 4, pág. 56, 2023. DOI: [10.1038/s43247-023-00715-7](https://doi.org/10.1038/s43247-023-00715-7). dirección: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00715-7>.