



Escuela Técnica Superior de Ingeniería - ICAI
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

“Análisis del potencial de descarbonización de las bombas de calor en el sistema energético español y su impacto en las familias más vulnerables”

Autor: Dácil Sicilia Guelbenzu

Director: José Carlos Romero Mora

Codirector: Miguel Ángel Ríos Ocampo

Madrid, enero 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
*“Análisis del potencial de descarbonización de las bombas de calor en el sistema
energético español y su impacto en las familias más vulnerables”*

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/2025 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Dácil Sicilia Guelbenzu

Fecha: 12/01/2025



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR Y CODIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José Carlos Romero Mora

Fdo.: Miguel Ángel Ríos Ocampo

Fecha: 12/01/2025

Fecha: 12/01/2025





Escuela Técnica Superior de Ingeniería - ICAI
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

“Análisis del potencial de descarbonización de las bombas de calor en el sistema energético español y su impacto en las familias más vulnerables”

Autor: Dácil Sicilia Guelbenzu

Director: José Carlos Romero Mora

Codirector: Miguel Ángel Ríos Ocampo

Madrid, enero 2025

Agradecimientos

Me gustaría, en primer lugar, expresar mi más sincero agradecimiento a mi director y codirector por su invaluable guía, apoyo constante y dedicación a lo largo del desarrollo de este trabajo.

En segundo lugar, a mi madre, por ser un ejemplo de fortaleza, resiliencia y dedicación.

Gracias, mamá, por inspirarme cada día.

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE DESCARBONIZACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR EN EL SISTEMA ENERGÉTICO ESPAÑOL Y SU IMPACTO EN LAS FAMILIAS MÁS VULNERABLES

Autor: Sicilia Guelbenzu, Dácil.

Director: Romero Mora, José Carlos.

Codirector: Ríos Ocampo, Miguel Ángel.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo busca analizar y evaluar el papel de las bombas de calor en la transición hacia un sistema energético descarbonizado en España a través del modelo openMASTER desarrollado por el Instituto de Investigación Tecnológica (ITT) de la Universidad Pontificia Comillas. Gracias a la nueva parametrización de la bomba de calor desarrollada en este proyecto, se logra una imagen más exhaustiva y actualizada del potencial de esta tecnología. En base a este análisis, el número de instalaciones aerotérmicas crecerá en 2,73 millones entre 2025 y 2050, mientras que las geotérmicas aumentarán de 4.075 a 9.656 en el mismo periodo. Para superar el desafío en su implantación en relación con la pobreza energética, se requiere una inversión pública sustancial, estimada en 300,8 millones de euros anuales entre los años 2025 y 2050.

Palabras clave: Bomba de calor, modelo openMASTER, aerotermia, geotermia, pobreza energética, transición energética, LCOH.

1. Introducción

La transición hacia modelos energéticos sostenibles y descarbonizados se ha consolidado como un desafío prioritario para España y la Unión Europea, enmarcada en ambiciosos planes como el Pacto Verde Europeo y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC). Estas iniciativas buscan reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, incrementar la eficiencia energética y promover el uso de fuentes renovables. En este contexto, las bombas de calor destacan como una tecnología clave para la descarbonización del sector residencial, no solo por su capacidad para aprovechar fuentes de energía ambiental, sino también por su contribución a la electrificación sostenible y al impulso del uso de energías renovables. Sin embargo, su implementación a gran escala plantea retos técnicos, económicos y sociales, que demandan un análisis profundo para maximizar sus beneficios y minimizar sus barreras.

2. Definición del proyecto

El objetivo principal de este trabajo es analizar y evaluar el papel de las bombas de calor en la transición hacia un sistema energético descarbonizado en España, considerando su impacto desde una perspectiva ambiental, social y económica. La investigación se enfocará en evaluar su contribución a la reducción de emisiones en el sector residencial, su acceso a los hogares más vulnerables y su potencial para disminuir la dependencia de combustibles fósiles. Para ello, se trabajará en la mejora de la parametrización y el nivel de detalle de las bombas de calor dentro del modelo openMASTER, elaborado por el Instituto de Investigación Tecnológica (ITT) de la Universidad Pontificia Comillas, con el propósito de

proporcionar una representación más precisa de su relevancia dentro de la transición energética y la obtención de conclusiones de alto valor añadido.

3. Descripción del modelo

El modelo openMASTER, se posiciona como una herramienta avanzada de planificación energética diseñada para abordar los retos de la transición energética hacia un sistema descarbonizado. Este se basa en la plataforma Pyomo, un lenguaje de modelado de optimización de código abierto basado en Python. OpenMASTER combina la flexibilidad del software de código abierto con la potencia de un modelo de equilibrio parcial dinámico y de programación lineal. Esto le permite realizar análisis detallados a largo plazo considerando restricciones técnicas, políticas y económicas. Entre sus características más destacadas se encuentra su capacidad para optimizar la oferta energética bajo múltiples objetivos: minimizar los costes económicos del suministro, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y considerar los costes intangibles vinculados al bienestar social y las implicaciones de las políticas energéticas.

No obstante, el modelo actual carece de una parametrización detallada que refleje adecuadamente el papel crítico de las bombas de calor en la transición energética. Por consiguiente, una de las principales aportaciones de este trabajo es la implementación dentro de este modelo de una parametrización que represente una versión más exhaustiva y actualizada para la tecnología de la bomba de calor.

4. Resultados

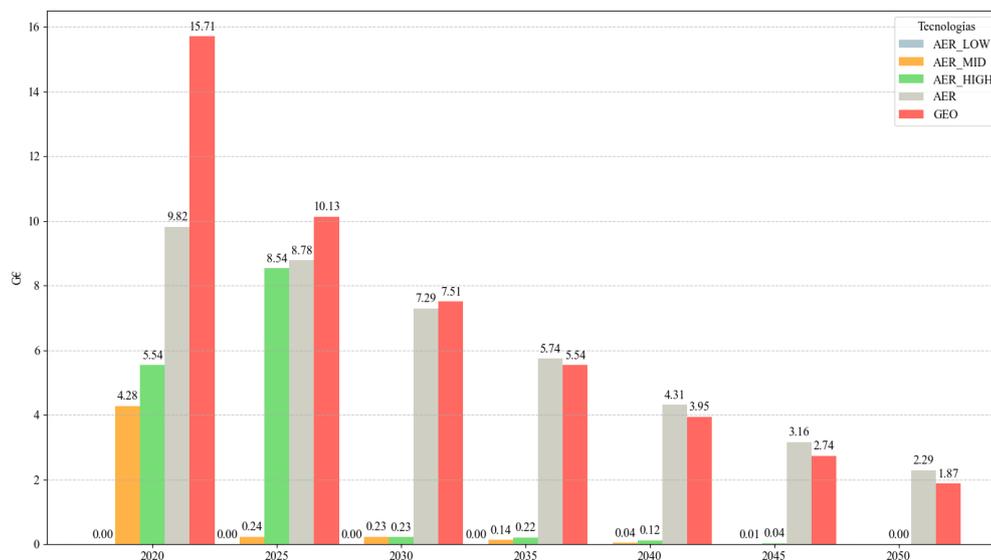
La nueva parametrización elaborada para las bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas destaca avances significativos en el periodo 2025-2050. El número de instalaciones aerotérmicas crecerá de 4.381.545 en 2025 a 7.110.598 en 2050, mientras que las geotérmicas aumentarán de 4.075 a 9.656 en el mismo periodo, evidenciando una adopción sostenida. En términos de eficiencia energética promedio, el COP de la aerotermia mejorará de 5,69 en 2025 a 5,99 en 2050, y su SPF de 3,55 a 5,36, mientras que para la geotermia el COP crecerá de 8,13 a 8,56 y su SPF de 5,01 a 6,29. Asimismo, los costes de inversión inicial disminuirán de 693 €/kW en 2025 a 540 €/kW en 2050 para la aerotermia, y de 4.958 €/kW a 3.902 €/kW en el caso de la geotermia, reduciendo el LCOH de 100,12 €/MWh a 83,05 €/MWh y de 76,62 €/MWh a 63,17 €/MWh, respectivamente.

Por otro lado, los resultados del modelo en base a la nueva parametrización muestran que, aunque las calderas de condensación de gas natural dominaron hasta 2045, las bombas de calor aerotérmicas emergen como la tecnología principal en 2050, alcanzando 89,37 GW de capacidad instalada, gracias a su alta eficiencia energética y competitividad económica. Por otro lado, las tecnologías aerotérmicas y geotérmicas concentran una gran inversión en 2025, con 8,78 mil millones de euros y 10,13 mil millones respectivamente, tal y como se muestra en la siguiente figura. En un escenario alternativo sin límites de capacidad, las bombas de calor geotérmicas alcanzarían una capacidad instalada de casi 395 GW en 2050, superando ampliamente a las aerotérmicas, cuya contribución resulta marginal.

La bomba de calor se presenta como una solución clave para combatir la pobreza energética en España, al combinar eficiencia energética y reducción de emisiones con mejoras en la calidad de vida de los hogares vulnerables. No obstante, su elevado coste inicial representa una barrera significativa, especialmente para las familias en situación de vulnerabilidad, donde se estima que más del 20% de los hogares enfrentan dificultades para mantener una

temperatura adecuada según indicadores oficiales. Para superar este desafío, se requiere una inversión pública sustancial, estimada en 300,8 millones de euros anuales entre 2025 y 2050, a través de distintas subvenciones que faciliten el acceso a esta tecnología y aseguren su despliegue equitativo. Además de reducir la pobreza energética, contribuyen a la descarbonización, mejora de la calidad del aire y bienestar social, destacando el papel esencial de políticas públicas y fondos europeos en esta transición.

Desglose de los costes de inversión según el tipo de bomba de calor en el sector residencial.



Elaboración propia a partir de [25].

Finalmente, el análisis del potencial de descarbonización de las bombas de calor evidencia su relevancia para alcanzar los objetivos climáticos, pero también evidencia importantes limitaciones. Dados los límites en la capacidad instalada de las bombas de calor, el modelo recurre a tecnologías alternativas, como las calderas de condensación de gas natural, para satisfacer la demanda energética. Esto se debe a que, aunque las emisiones del sector residencial disminuyen progresivamente, estas siguen superando los límites establecidos por el PNIEC, con un exceso de 17,02 MtCO₂ en 2035 y 9,2 MtCO₂ en 2050. Estos resultados subrayan la necesidad de adoptar objetivos más ambiciosos para el despliegue de bombas de calor y de integrar tecnologías renovables como por ejemplo aquellas basadas en gases renovables. Esto refleja que la descarbonización del sector residencial no puede depender exclusivamente de una sola tecnología, sino de una combinación de soluciones renovables que permitan reducir emisiones y cumplir con las metas climáticas.

5. Conclusiones

En definitiva, estos resultados se presentan como una argumentación sólida a favor de la bomba de calor como tecnología clave en la descarbonización del sector residencial, así como una oportunidad estratégica, especialmente para los hogares más vulnerables. Sin duda este análisis confirma un futuro prometedor para esta tecnología en el ámbito nacional, debido a su elevada eficiencia, tanto presente como futura, y el amplio apoyo gubernamental que presenta a través de distintas iniciativas y planes estratégicos. Aunque la implementación de esta tecnología requiera de subvenciones iniciales para posicionarse de manera competitiva, en el largo plazo se espera una considerable reducción del coste de inversión inicial como consecuencia de las economías de escala y su progresivo grado de madurez, haciéndola accesible a los hogares más vulnerables.

ANALYSIS OF THE DECARBONIZATION POTENTIAL OF HEAT PUMPS IN THE SPANISH ENERGY SYSTEM AND THEIR IMPACT ON THE MOST VULNERABLE HOUSEHOLDS

Author: Sicilia Guelbenzu, Dácil.

Supervisor: Romero Mora, José Carlos.

Cosupervisor: Ríos Ocampo, Miguel Ángel.

Collaborating Entity: ICAI – Pontifical Comillas University.

ABSTRACT

This study aims to analyze and evaluate the role of heat pumps in the transition toward a decarbonized energy system in Spain through the openMASTER model developed by the Institute for Research in Technology (ITT) at Comillas Pontifical University. Thanks to the new heat pump parameterization developed in this project, a more comprehensive and updated picture of the potential of this technology is achieved. Based on this analysis, the number of aérothermal installations is projected to grow by 2.73 million between 2025 and 2050, while geothermal installations are expected to increase from 4,075 to 9,656 over the same period. To address the challenge of implementation concerning energy poverty, substantial public investment is required, estimated at €300.8 million annually between 2025 and 2050.

Keywords: Heat pump, openMASTER model, aérothermal, geothermal, energy poverty, energy transition, LCOH.

1. Introduction

The transition towards sustainable and decarbonized energy systems has become a top priority for Spain and the European Union, framed within ambitious initiatives such as the European Green Deal and the National Integrated Energy and Climate Plan (PNIEC). These efforts aim to significantly reduce greenhouse gas emissions, enhance energy efficiency, and promote the use of renewable energy sources. In this context, heat pumps stand out as a key technology for decarbonizing the residential sector, not only due to their ability to harness environmental energy sources but also for their contribution to sustainable electrification and the increased integration of renewable energies. However, large-scale implementation of heat pumps presents technical, economic, and social challenges that require in-depth analysis to maximize their benefits and address existing barriers.

2. Project definition

The main objective of this work is to analyze and evaluate the role of heat pumps in the transition to a decarbonized energy system in Spain, considering their impact from environmental, social, and economic perspectives. The research will focus on assessing their contribution to emissions reduction in the residential sector, their accessibility for the most vulnerable households, and their potential to reduce dependence on fossil fuels. To achieve this, efforts will be directed toward improving the parameterization and level of detail of heat pumps within the openMASTER model, developed by the Institute for Research in Technology (ITT) at Comillas Pontifical University. The aim is to provide a more accurate

representation of their significance in the energy transition and to derive high-value-added conclusions.

3. Description of the model

The openMASTER model stands as an advanced energy planning tool designed to address the challenges of the energy transition toward a decarbonized system. It is based on the Pyomo platform, an open-source optimization modeling language built on Python. OpenMASTER combines the flexibility of open-source software with the power of a dynamic partial equilibrium model and linear programming. This enables it to perform detailed long-term analyses while accounting for technical, policy, and economic constraints. Among its most notable features is its ability to optimize energy supply under multiple objectives: minimizing economic supply costs, reducing greenhouse gas emissions, and considering intangible costs related to social welfare and the implications of energy policies.

However, the current model lacks detailed parameterization that adequately reflects the critical role of heat pumps in the energy transition. Consequently, one of the main contributions of this work is the implementation of a parameterization within this model that represents a more comprehensive and updated depiction of heat pump technology.

4. Results

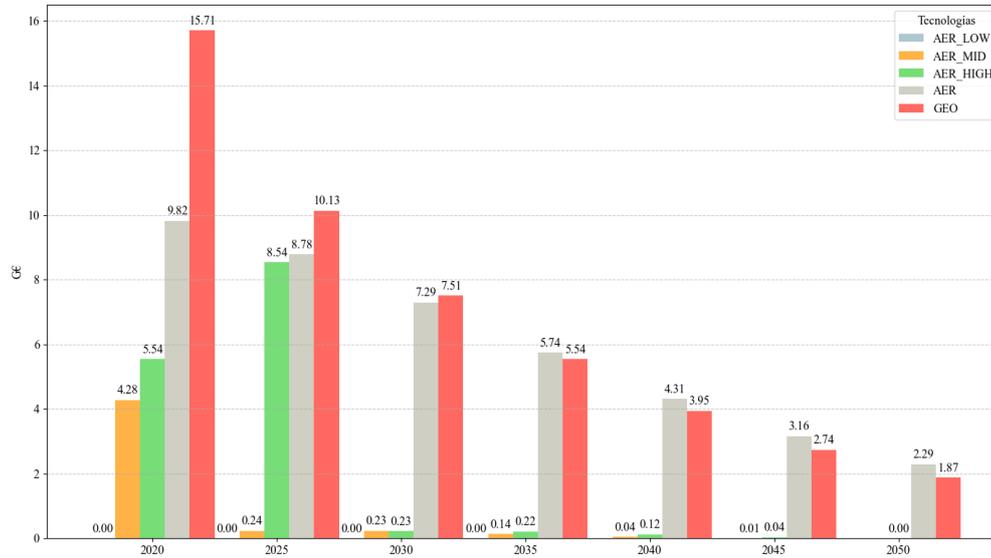
The new parameterization developed for aerothermal and geothermal heat pumps highlights significant advancements for the 2025-2050 period. The number of aerothermal installations is projected to grow from 4,381,545 in 2025 to 7,110,598 in 2050, while geothermal installations will increase from 4,075 to 9,656 during the same period, demonstrating sustained adoption. In terms of average energy efficiency, the coefficient of performance (COP) for aerothermal technology will improve from 5.69 in 2025 to 5.99 in 2050, with its seasonal performance factor (SPF) increasing from 3.55 to 5.36. For geothermal technology, the COP will rise from 8.13 to 8.56, and the SPF from 5.01 to 6.29. Additionally, initial investment costs will decrease from 693 €/kW in 2025 to 540 €/kW in 2050 for aerothermal technology, and from 4,958 €/kW to 3,902 €/kW for geothermal systems. This reduction will lead to a decline in the levelized cost of heat (LCOH) from 100.12 €/MWh to 83.05 €/MWh for aerothermal technology, and from 76.62 €/MWh to 63.17 €/MWh for geothermal systems.

Moreover, the model results based on the new parameterization show that while natural gas condensing boilers dominated until 2045, aerothermal heat pumps emerge as the primary technology by 2050, achieving an installed capacity of 89.37 GW due to their high energy efficiency and economic competitiveness. Aerothermal and geothermal technologies are expected to attract significant investments in 2025, amounting to €8.78 billion and €10.13 billion, respectively, as illustrated in the following figure. In an alternative scenario without capacity limits, geothermal heat pumps could reach an installed capacity of nearly 395 GW by 2050, far surpassing aerothermal technology.

Heat pumps emerge as a key solution to combating energy poverty in Spain, combining energy efficiency and emissions reduction with improvements in the quality of life for vulnerable households. However, their high initial cost represents a significant barrier, particularly for families in vulnerable situations, where it is estimated that more than 20% of households face difficulties maintaining adequate indoor temperatures according to

official indicators. To overcome this challenge, substantial public investment is required, estimated at €300.8 million annually between 2025 and 2050, through various subsidies that facilitate access to this technology and ensure its equitable deployment. Beyond reducing energy poverty, heat pumps contribute to decarbonization, improved air quality, and social well-being, underscoring the essential role of public policies and European funds in this transition.

Breakdown of investment costs by type of heat pump in the residential sector.



Own elaboration based on [25].

Finally, the analysis of the decarbonization potential of heat pumps highlights their importance in achieving climate objectives but also reveals significant limitations. Given the constraints on the installed capacity of heat pumps, the model resorts to alternative technologies, such as natural gas condensing boilers, to meet energy demand. Although emissions from the residential sector progressively decrease, they still exceed the limits set by the PNIEC, with an excess of 17.02 MtCO₂ in 2035 and 9.2 MtCO₂ in 2050. These results underscore the need to adopt more ambitious targets for the deployment of heat pumps and to integrate renewable technologies, such as those based on renewable gases. This reflects that the decarbonization of the residential sector cannot rely exclusively on a single technology but rather requires a combination of renewable solutions that can reduce emissions and meet climate targets.

5. Conclusions

In summary, these results provide a strong argument in favor of heat pumps as a key technology for the decarbonization of the residential sector, as well as a strategic opportunity, particularly for the most vulnerable households. This analysis undoubtedly confirms a promising future for this technology at the national level, owing to its high efficiency, both current and projected, and the substantial government support it receives through various initiatives and strategic plans. While the implementation of this technology initially requires subsidies to achieve competitive positioning, in the long term, a significant reduction in initial investment costs is expected due to economies of scale and its increasing maturity, making it more accessible to vulnerable households.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Objetivos del trabajo	5
Capítulo 3. Estado del arte	6
3.1 Bomba de calor.....	6
3.1.1 Fundamentos de la bomba de calor	6
3.1.2 Tipos de bomba de calor	9
3.2 La Bomba de Calor en España	12
3.2.1 Contexto de mercado.....	12
3.2.2 Políticas a nivel nacional y europeo	13
3.3 Pobreza energética.....	14
3.3.1 Definición	14
3.3.2 Medición.....	14
3.3.3 Políticas nacionales.....	16
3.4 Modelo de descarbonización energética en España	17
3.4.1 Introducción al modelo openMASTER.....	17
3.4.2 Particularidades de la herramienta	18
3.4.3 Formulación matemática y restricciones del modelo.....	19
3.4.4 Parametrización de la bomba de calor	21
Capítulo 4. Metodología empleada	23
4.1 Fuentes y tratamiento de datos	23
4.2 Proyección de datos.....	25
4.3 Implementación en la herramienta openMASTER	26

Capítulo 5. Aplicación al caso de estudio	28
5.1 Descripción de las variables empleadas	28
5.2 Proyecciones realizadas.....	31
5.2.1 Proyección de las variables de capacidad e infraestructura	32
5.2.2 Proyección de las variables de eficiencia y rendimiento	33
5.2.3 Proyección de variables de producción y consumo energético.....	40
5.2.4 Proyección de las variables económicas.....	41
5.2.5 Proyección de capacidad máxima según la tecnología.....	50
5.3 Parametrización obtenida para la bomba de calor	52
5.4 Implementación en el modelo openMASTER	56
5.4.1 Contextualización del modelo	56
5.4.2 Adaptación al modelo.....	58
5.4.3 Resultados obtenidos	63
Capítulo 6. Conclusiones.....	78
Capítulo 7. Bibliografía.....	84
Capítulo 8. Anexos.....	89
Anexo I: Diagrama conceptual del modelo openMASTER.....	89
Anexo II: Diccionario de variables del modelo openMASTER	90
Anexo III: Objetivos de desarrollo sostenible.....	91

Índice de figuras

Figura 1: Evolución prevista de las emisiones GEI por sector desde 1990 hasta 2050, para el escenario de neutralidad climática.....	2
Figura 2: Funcionamiento en invierno y verano con una válvula de reversión de cuatro vías.	7
Figura 3: Esquema básico y diagrama T-s para la bomba de calor.	7
Figura 4: Clasificación de los indicadores de pobreza energética más relevantes.	16
Figura 5: Datos históricos de la evolución del número de plantas y potencia térmica total.	32
Figura 6: Evolución de las horas de funcionamiento para bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas.	33
Figura 7: Número de bombas de calor en España según COP y tendencia observada.....	35
Figura 8: Evolución del factor de rendimiento medio estacional según la bomba de calor.	39
Figura 9: Evolución de la producción y consumo energético en bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas.	40
Figura 10: Costes totales de instalación por tecnología, hasta 2020 (Reino Unido y resto del mundo).....	42
Figura 11: Evolución temporal del LCOH para la bomba de calor.	50
Figura 12: Evolución de los certificados fin de obra expedidos por los colegios de aparejadores.	52
Figura 13: Evolución de la capacidad total instalada por tecnología de suministro y año en el sector residencial.	64
Figura 14: Evolución de la nueva capacidad instalada por tecnología de suministro y año en el sector residencial.	65
Figura 15: Evolución de la capacidad total instalada de bombas de calor por año en el sector residencial.	66
Figura 16: Nueva capacidad instalada de bombas de calor por año en el sector residencial.	67
Figura 17: Evolución del coste de inversión en tecnologías de suministro (ST) y su detalle en el sector residencial.....	68

Figura 18: Desglose de los costes de inversión según el tipo de bomba de calor en el sector residencial.....	69
Figura 19: Exceso de emisiones de CO ₂ respecto al límite de carbono según sector.....	73
Figura 20: Evolución de las emisiones totales de CO ₂ en el sector residencial y su comparación con el límite de CO ₂ establecido según el Escenario PNIEC 2023-2050.....	73
Figura 21: Evolución de la capacidad total instalada de bombas de calor por año en el sector residencial, sin considerar los límites de capacidad máxima.	76
Figura 22: Evolución de la capacidad total instalada por tecnología de suministro y año en el sector residencial, sin considerar los límites de capacidad máxima.....	76
Figura 23: Evolución de las emisiones totales de CO ₂ en el sector residencial y su comparación con el límite de CO ₂ establecido según el Escenario PNIEC 2023-2050, sin considerar los límites de capacidad máxima.	77
Figura 24: Diagrama conceptual del modelo openMASTER.....	89

Índice de tablas

Tabla 1: Comparativa según las tecnologías actuales de la bomba de calor.	11
Tabla 2: Datos estadísticos de las bombas de calor en 2023 en España.	12
Tabla 3: Evolución del COP del parque de bombas de calor por año de puesta en funcionamiento.	34
Tabla 4: Distribución histórica y proyecciones del parque de bombas de calor en España según COP y año de instalación.	36
Tabla 5: Resultados del LCOH para la bomba de calor aerotérmica.	46
Tabla 6: Resultados del LCOH para la bomba de calor geotérmica.	47
Tabla 7: Detalle del cálculo del LCOH para la bomba de calor aerotérmica para el año 2025.	48
Tabla 8: Detalle del cálculo del LCOH para la bomba de calor geotérmica para el año 2025.	49
Tabla 9: Resultados de la parametrización y cálculo del LCOH para la bomba de calor aerotérmica.	53
Tabla 10: Resultados de la parametrización y cálculo del LCOH para la bomba de calor geotérmica.	54
Tabla 11: Diccionario de variables del modelo openMASTER.	90

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Los estados miembros de la Unión Europea se encuentran en un proceso de transición hacia modelos de sistemas energéticos sostenibles y descarbonizados. Esto supone en la actualidad uno de los principales retos de la Unión Europea y más concretamente de España. Es por esto por lo que tanto las regulaciones como políticas juegan un papel fundamental en lo referente al despliegue de fuentes de generación renovables, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la eficiencia energética en términos generales.

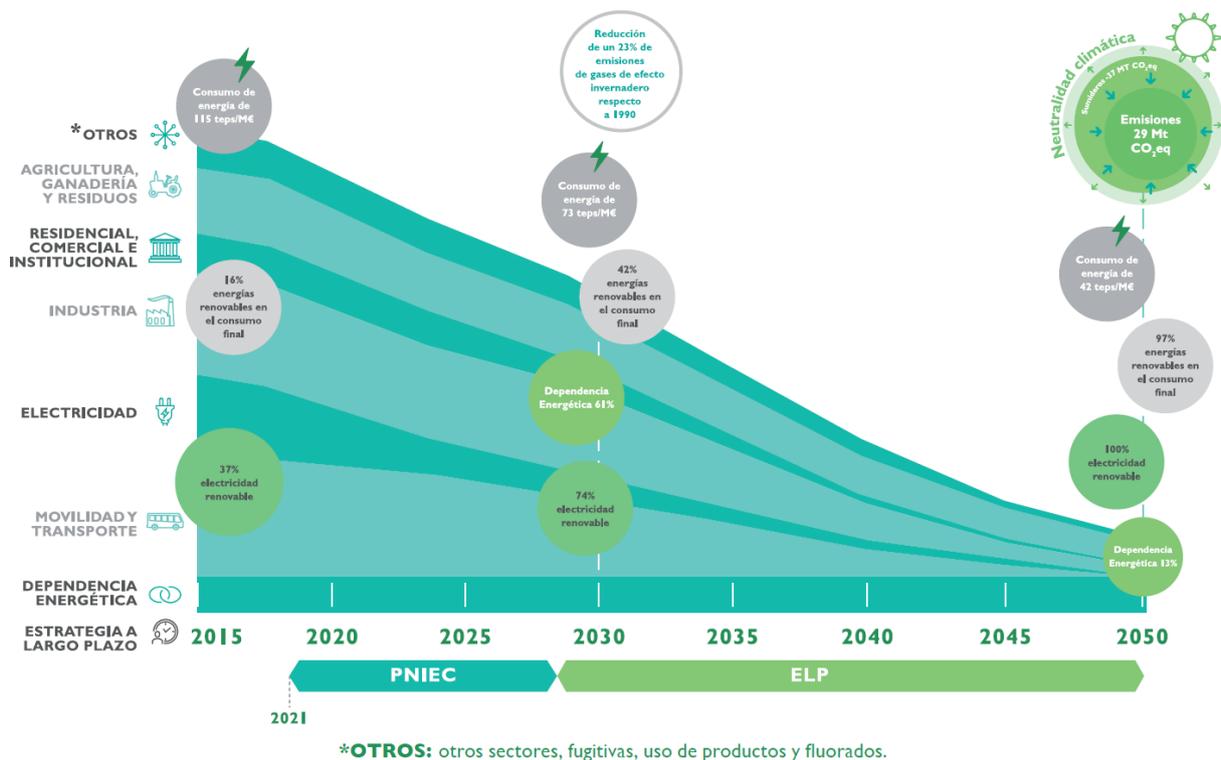
I. Horizonte de descarbonización en EU y España

El Pacto Verde Europeo (European Green Deal) [1] es una hoja de ruta y una serie de iniciativas políticas presentadas por la Comisión Europea en diciembre de 2019. Este pacto responde a los desafíos climáticos y ambientales, convirtiendo el proceso de transformación en una oportunidad única para convertir a la UE en una sociedad equitativa, próspera y sostenible. Su objetivo es promover una economía eficiente en la gestión y uso de los recursos, sin comprometer la competitividad de la región. En lo referente a las emisiones netas de gases de efecto invernadero se establece como objetivo una reducción de las emisiones totales de hasta un 55% en 2030, y en 2050 la Unión Europea se ha comprometido a ser climáticamente neutra. Dentro del marco del Pacto Verde Europeo se incluye la revisión de la Directiva de la Eficiencia Energética y la Estrategia de Renovación de Edificios [2]. En esta se contemplan factores clave para el establecimiento de una senda de descarbonización en el sector residencial. Más concretamente, dicha directiva promueve tecnologías clave como las bombas de calor entre otras.

En la misma línea, en España gracias al Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [3], publicado por primera vez en 2020 como primera versión y actualizado mediante su borrador en 2023 (con entrada en vigor en junio 2024), busca una reducción en 2030 de un 23% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) tomando como año base 1990. Dicho objetivo se trata de un esfuerzo en consonancia con la ambición europea ya comentada para ese mismo año. El PNIEC también persigue entre sus objetivos la búsqueda de una economía baja en emisiones y con poca dependencia de combustibles fósiles, el despliegue de tecnologías renovables en hasta un 42% y una mejora de la eficiencia energética en un 39,5% con respecto

al 2005 [3]. Se muestra en la Figura 1 la evolución prevista de las emisiones GEI por sector recogida en la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050 [4], que proporciona un plan integral donde se establecen las acciones necesarias para alcanzar la neutralidad climática para ese año.

Figura 1: Evolución prevista de las emisiones GEI por sector desde 1990 hasta 2050, para el escenario de neutralidad climática.



Obtenida de [4].

II. Extrapolación al sector residencial

Dentro del sector residencial en España, las bombas de calor suponen una tecnología con un gran potencial dentro de la estrategia de descarbonización. Esta tecnología aprovecha fuentes de calor procedentes del calor ambiental en el aire o el calor geotérmico para la calefacción y refrigeración de los espacios y la obtención de agua caliente sanitaria (ACS) en los edificios. Por consiguiente, las bombas de calor no solo ayudan a la descarbonización del sector residencial, sino que también implican una mejora en términos de eficiencia energética.

Existen distintas políticas a nivel nacional que buscan incentivar el despliegue de estos sistemas. Dentro del marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) financiado por la Unión Europea, el Gobierno de España ha puesto en marcha ayudas para energías renovables en autoconsumo, almacenamiento y sistemas térmicos en el sector residencial [5]. El programa 6 perteneciente a este paquete de ayudas menciona la “realización de instalaciones de energías renovables térmicas en el sector residencial”, ofreciendo subvenciones para la instalación de bombas de calor con un valor de 500 €/kW y pudiendo alcanzar hasta 3.000 euros por vivienda.

Sin embargo, aunque el despliegue de bombas de calor presenta múltiples ventajas como la reducción de las emisiones de carbono, ahorro en el consumo de energía primaria y el aumento la eficiencia global gracias a su elevado coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) [6], estas no se encuentran exentas de riesgos e incertidumbres. El despliegue a gran escala de las bombas de calor puede requerir inversiones adicionales, como refuerzos de la red eléctrica, adaptación de las viviendas y sustitución de las calderas. En zonas donde los cortes de suministro eléctrico son frecuentes, puede ser necesario un sistema de calefacción adicional junto a las bombas de calor [6]. Todas estas desventajas suponen un impedimento en la adopción de la bomba de calor como sistema de calefacción, en especial para aquellas familias en situación de vulnerabilidad.

Según un estudio sobre el potencial de descarbonización de las bombas de calor impulsadas por energías renovables en edificios residenciales realizado en el escenario español como caso de estudio [7], se destaca que el 8,5% de las emisiones de dióxido de carbono provienen del sector residencial de forma directa (excluyendo las emisiones relacionadas con la generación eléctrica consumida), con un 66% del consumo energético asociado a la climatización. Los resultados muestran una reducción del 8,43% en las emisiones totales, lo que demuestra que la bomba de calor jugará un papel relevante en la reducción de emisiones y mejora de la eficiencia energética en los sistemas de calefacción de los edificios.

Cabe destacar que se observaron otros beneficios adicionales a la electrificación como el aumento de la cuota de energía renovable en la red gracias a estos sistemas de climatización eléctrica y la facilitación de la integración de vehículos eléctricos, entre otros.

III. Motivación del trabajo e interés económico y social.

Con el presente Trabajo Fin de Máster, se aspira a evaluar la senda de penetración de las bombas de calor en el mercado energético español, así como analizar su impacto económico y social, con un especial énfasis en las familias más vulnerables. Este trabajo buscará tener una comprensión más profunda sobre cómo esta tecnología puede tener un impacto real en la descarbonización además de su relación con la pobreza energética y su contribución a la mejora de la calidad de vida de los segmentos de la población en mayor riesgo.

Desde un punto de vista económico, las bombas de calor tienen el potencial de generar oportunidades significativas ya que podrán generar empleo en sectores emergentes y reducir costes asociados a una alta dependencia de combustibles fósiles.

Desde una perspectiva social, estas tecnologías también desempeñarán un papel crucial, ya que permitirán paliar la vulnerabilidad energética especialmente en aquellos hogares en situación de pobreza energética al ofrecer una solución eficiente y sostenible.

En conclusión, gracias al presente trabajo se pretende aportar una visión holística sobre el papel potencial de las bombas de calor en la transición hacia un sistema energético más equitativo y justo en España. Para ello, se analizarán tanto los beneficios como los impactos económicos y sociales, con el objetivo de poder determinar el alcance que esta tecnología puede jugar a la hora de maximizar los beneficios para toda la sociedad.

Capítulo 2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Este proyecto tiene como finalidad analizar y profundizar en el papel de las bombas de calor dentro del proceso de descarbonización del sistema energético en España a través de la herramienta openMASTER, desarrollada por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas, así como su impacto potencial en términos económicos y sociales. A continuación, se presentan los objetivos principales que guiarán este trabajo:

- *Analizar el potencial de las bombas de calor en la descarbonización del sector residencial español:* más concretamente, se busca cuantificar el impacto que el despliegue de las bombas de calor puede tener en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en este sector. Para ello, se analizará cómo esta tecnología, al sustituir fuentes de calefacción convencionales, puede contribuir a los objetivos de neutralidad climática.
- *Estudiar el impacto social de las bombas de calor en hogares vulnerables:* dado que las bombas de calor representan una opción más eficiente y económica a largo plazo tanto para calefacción como refrigeración, este objetivo busca relacionar esta tecnología con los hogares en situación de pobreza energética.
- *Evaluar el impacto económico del despliegue de las bombas de calor:* este objetivo se centra en calcular los costes de inversión que implica la adopción de bombas de calor según sus distintos tipos. También se busca profundizar en el coste nivelado de calefacción, evaluando tanto su actual situación como sus expectativas a futuro.
- *Optimizar la parametrización de las bombas de calor dentro del modelo openMASTER:* a través del uso del modelo, se pretende estudiar los principales parámetros asociados a las bombas de calor en distintos escenarios, evaluando factores como la eficiencia energética y el coste de implementación. Este objetivo será la base para obtener los resultados comentados en los anteriores puntos, ofreciendo así una imagen fiel y actualizada del potencial de esta tecnología.

Capítulo 3. ESTADO DEL ARTE

3.1 BOMBA DE CALOR

3.1.1 FUNDAMENTOS DE LA BOMBA DE CALOR

Los dos principios de la termodinámica son fundamentales para poder entender el funcionamiento de un sistema de transferencia de calor, como lo son las bombas de calor. El primer principio de la termodinámica establece la conservación de la energía. Por otro lado, el segundo principio indica que la suma del calor intercambiado con las fuentes y la entropía producida debe ser igual a cero, teniendo en cuenta la relación entre las temperaturas de los focos térmicos.

Primer principio de la termodinámica:

$$Q_c + Q_E = W \quad (Q_c < 0; W < 0)$$

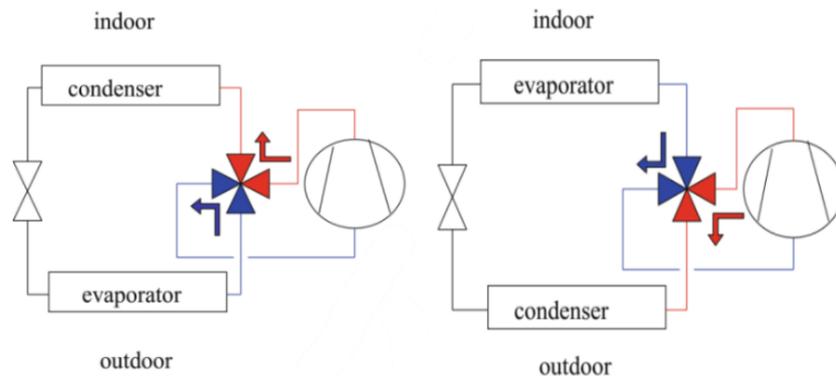
Segundo principio de la termodinámica:

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_E}{T_E} + S_g = 0$$

Ambos proporcionan una base sólida para analizar la eficiencia y el rendimiento de la bomba de calor.

Esta tecnología transfiere energía térmica de una zona fría a una caliente mediante un ciclo termodinámico, lo que le permite funcionar de manera reversible. Mas concretamente, gracias a una válvula de inversión de cuatro vías, puede proporcionar calefacción durante el invierno y refrigeración en verano, como se ilustra en la Figura 2. A diferencia de sistemas convencionales que generan calor mediante combustión o resistencias eléctricas, la bomba de calor extrae y transfiere calor entre medios, lo que la convierte en una solución altamente eficiente para la climatización de espacios [8].

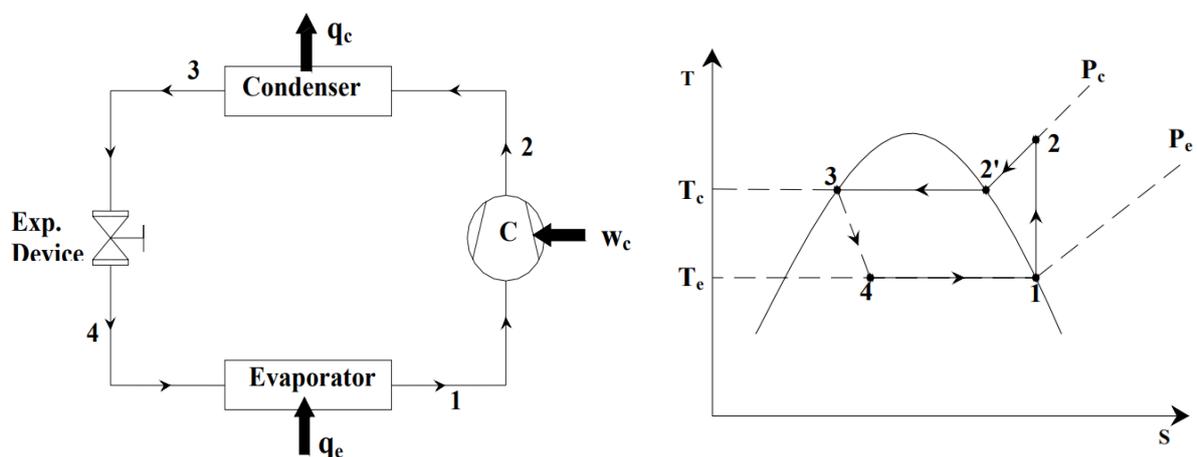
Figura 2: Funcionamiento en invierno y verano con una válvula de reversión de cuatro vías.



Obtenido de [8].

El funcionamiento de la bomba de calor se basa en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, específicamente en el ciclo de Evans-Perkins, también conocido como ciclo de Rankine inverso [9]. La Figura 3 muestra el esquema de un sistema de refrigeración por compresión de vapor estándar, saturado y de una sola etapa, que constituye el diseño fundamental de una bomba de calor por compresión. Este esquema incluye los componentes principales de esta tecnología: un compresor, un condensador, una válvula expansiva y un evaporador.

Figura 3: Esquema básico y diagrama T-s para la bomba de calor.



Obtenido de [9].

Analizando en mayor detalle su ciclo operativo en un diagrama T-s, el cual se puede consultar en la Figura 3, el sistema estándar de refrigeración por compresión de vapor de una sola etapa y saturado consta de los siguientes cuatro procesos [10]:

Compresión isentrópica [1-2]: El ciclo comienza cuando el vapor saturado entra al compresor y se comprime adiabáticamente, es decir, sin intercambio de calor con el entorno. Esta compresión eleva tanto la temperatura como la presión del vapor hasta alcanzar la temperatura de condensación. El trabajo externo realizado en el compresor se puede expresar como:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico del fluido refrigerante y h representa la entalpía en los puntos respectivos del ciclo.

Condensación isobárica [2-3]: El vapor sobrecalentado entra al condensador, donde cede calor al ambiente externo (foco caliente) y se convierte en líquido saturado a una presión constante. Este proceso de transferencia de calor se realiza a la temperatura de condensación y se define mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

Expansión isentálpica [3-4]: En este proceso, el líquido refrigerante atraviesa una válvula de expansión que reduce su presión desde la presión del condensador hasta la presión del evaporador. Este proceso es isentálpico, lo cual implica que el refrigerante no experimenta cambio en su entalpía:

$$h_3 = h_4$$

Evaporización isobárica [4-1]: En el último proceso del ciclo, el líquido refrigerante a a presión de entrada del evaporador entra a este, donde absorbe calor del entorno (foco frío) y se evapora hasta convertirse en vapor saturado. Este proceso de absorción de calor se expresa como:

$$\dot{q}_e = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

En cuanto al rendimiento de una bomba de calor, es esencial considerar dos indicadores clave: el coeficiente de rendimiento (COP) y el ratio de eficiencia energética (EER, por sus siglas en inglés). Mientras que el COP mide la eficiencia en la capacidad de calefacción, el ERR se utiliza para medir la capacidad de enfriamiento de la bomba de calor [11]. El COP y el ERR quedan definidos como el cociente entre el calor entregado al espacio deseado y el trabajo suministrado al compresor:

$$COP_{BC} = \frac{Q_c}{W} = \frac{1}{1 - \frac{Q_E}{|Q_C|}} = \frac{1}{1 - \frac{T_E}{T_C} \left(1 - \frac{T_C S_g}{|Q_C|}\right)}$$

$$ERR_{BC} = \frac{Q_E}{|W|} = \frac{1}{\frac{|Q_C|}{Q_E} - 1} = \frac{1}{\frac{T_C}{T_E} \left(1 + \frac{T_E S_g}{Q_E}\right) - 1}$$

Donde Q es el calor intercambiado con las fuentes térmicas, T su temperatura termodinámica expresada en Kelvin y S_g la cantidad de entropía producida. El término S_g depende de las condiciones de operación y $T_C S_g$, $T_E S_g$ representan las pérdidas de energía causadas por las irreversibilidades [8]. Se observa cómo las irreversibilidades reducen el valor del COP y ERR.

3.1.2 TIPOS DE BOMBA DE CALOR

Las bombas de calor pueden clasificarse en función de múltiples criterios, siendo uno de los más relevantes la fuente origen de calor. De acuerdo con este criterio, las bombas de calor se dividen en tres grandes grupos: aerotérmicas (aire-aire y aire-agua), hidrotérmicas (agua-agua y agua-aire) y geotérmicas. Al describir una bomba de calor, se menciona primero la fuente de calor, seguida del destino o sumidero de calor [12]. A continuación, se detallan algunas de las tecnologías más extendidas e implementadas:

I. Bombas de calor aerotérmicas

- *Aire-aire*: las bombas de calor aire-aire extraen calor del aire exterior y lo transfieren directamente al aire interior de un edificio. Son comunes en sistemas de calefacción y refrigeración central, y su instalación es relativamente sencilla y menos costosa en comparación con otros tipos de bombas de calor. Funcionan eficientemente en climas moderados, no obstante, pierden eficacia ante temperaturas de frío extremo [13].
- *Aire-agua*: estas bombas extraen calor del aire exterior y lo transfieren al agua, que luego puede ser utilizada para calefacción a través de radiadores, suelos radiantes o para agua caliente sanitaria. Son versátiles y pueden integrarse con sistemas de calefacción existentes. También experimentan una disminución en su eficiencia en climas muy fríos [13].

II. *Bombas de calor hidrotérmicas*

- *Agua-agua*: estas utilizan una fuente de agua (como un lago, río, o acuífero) para extraer calor y transferirlo al agua de un sistema de calefacción. Son muy eficientes y pueden proporcionar calefacción y refrigeración, pero su instalación es más compleja y costosa debido a la necesidad de acceso a una fuente de agua adecuada [13].
- *Agua-aire*: estas extraen calor de una fuente de agua y lo transfieren al aire interior. Este tipo de bomba es menos común, pero puede ser útil en instalaciones industriales o comerciales donde hay disponibilidad de fuentes de agua y la necesidad de calefacción y refrigeración del aire [13].

III. *Bombas de calor geotérmicas*

- *Acoplada al Suelo*: estas aprovechan el calor del subsuelo, cuya temperatura es relativamente estable en comparación con la del aire ambiente y se mantiene constante a lo largo del año, para proporcionar calefacción y refrigeración a través de tuberías enterradas. Son altamente eficientes y tienen un bajo impacto ambiental, pero la instalación puede ser costosa debido a la necesidad de realizar perforaciones [13].
- *Expansión directa*: estos sistemas emplean refrigerante que circula directamente por tuberías enterradas, eliminando la necesidad de un intercambiador de calor intermedio. Esto mejora la eficiencia, pero requiere mayor precisión en el diseño e instalación [13].

IV. *Bombas de calor con asistencia solar*

- *Expansión directa (DX-SAGSHP)*: estas bombas combinan tecnología de la bomba calor de expansión directa con colectores solares. El refrigerante circula tanto a través de los colectores solares como del subsuelo, capturando energía solar para aumentar la eficiencia del sistema. Son ideales para climas soleados y pueden reducir significativamente el consumo de energía [13].
- *Expansión indirecta (IDX-SAGSHP)*: las bombas de calor asistidas de expansión indirecta utilizan un fluido intermedio para transferir el calor capturado por los colectores solares a la bomba de calor. Esta configuración puede ser más flexible y fácil de integrar con sistemas de calefacción existentes [13].

En definitiva, la selección del tipo de bomba de calor viene determinada según las necesidades específicas del usuario y la vivienda, así como las condiciones climáticas locales como la disponibilidad de fuentes de calor adecuadas. Como se detalla anteriormente, cada bomba de calor tiene sus propias ventajas y desventajas, lo que requiere evaluar detenidamente estos aspectos a la hora de elegir el sistema de climatización más adecuado.

En la Tabla 1 se incluye una tabla resumen con las distintas tecnologías antes comentadas, subrayando las ventajas y desventajas inherentes a cada una.

Tabla 1: Comparativa según las tecnologías actuales de la bomba de calor.

Tecnología	COP promedio	Coste de instalación	Impacto medioambiental	Ventajas	Desventajas
Bomba de calor de fuente de aire	3	+	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor impacto ambiental en regiones frías. - Fugas de refrigerante pueden causar contaminación. - Contaminación acústica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pocas o ninguna preocupación por contaminación. - Operación sencilla. - Bajo coste de mantenimiento. - Alta eficiencia. - Menor consumo de energía primaria y emisiones de GEI en comparación con sistemas basados en combustibles fósiles. - Bajos costes de instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> - La capacidad de calefacción y el COP pueden disminuir en climas fríos. - Formación de escarcha en las unidades exteriores. - Puede requerir un sistema de calefacción suplementario para un mejor rendimiento.
Bomba de calor de fuente de agua	4,5	++	<ul style="list-style-type: none"> - Contaminación del agua, asentamiento del suelo y riesgo de desastres geológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - No se ve afectada por las condiciones ambientales. - Puede aprovechar el calor de ríos y lagos. - Alta eficiencia y gran potencial de ahorro energético. - COP y EER más altos que las bombas de calor de fuente de aire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere cuerpos de agua o tanques de almacenamiento en las proximidades. - Necesita permisos regulatorios para su instalación. - La baja calidad del agua puede causar obstrucciones, corrosión y ensuciamiento de los intercambiadores de calor. - La disponibilidad de agua puede restringir el uso de bombas de calor de fuente de agua.
Bomba de calor de fuente geotérmica	3,5 - 4	+++	<ul style="list-style-type: none"> - Los fluidos de transferencia de calor no controlados son peligrosos. - El agua superficial puede entrar en el pozo. - Puede perturbar la temperatura del agua subterránea. - Reduce las emisiones con un bajo período de retorno de inversión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza una fuente de calor abundante. - Fuente de calor muy confiable. - Puede operar en regiones con condiciones extremas de invierno. - Más adecuada para aplicaciones en climas fríos en comparación con las bombas de calor de fuente de aire. - Reducción significativa de emisiones de GEI en comparación con sistemas basados en combustibles fósiles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere una evaluación cuidadosa de la geología local y sus requisitos. - El COP puede disminuir durante la temporada de calefacción debido a la saturación de la temperatura del suelo. - Altos costes de instalación y requerimientos de terreno. - Posibles fugas de refrigerantes y soluciones anticongelantes. - Corrosión de los intercambiadores de calor enterrados.
Bomba de calor asistida por energía solar	> COP bomba de calor individual	++ a +++++	<ul style="list-style-type: none"> - Beneficios ambientales significativos. - Puede reducir las emisiones en un 50%. 	<ul style="list-style-type: none"> - La energía solar ayuda a las bombas de calor a alcanzar un COP más alto. - Reduce el consumo de electricidad de la red. - Puede lograr hasta un 70% de ahorro energético. - Proporciona calor a mayor temperatura para las bombas de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> - La intermitencia solar restringe el rendimiento del sistema. - Necesita un mecanismo de control adicional para una operación óptima. - Costes de instalación relativamente altos.

Elaboración propia a partir de [6] y [13].

3.2 LA BOMBA DE CALOR EN ESPAÑA

3.2.1 CONTEXTO DE MERCADO

La bomba de calor ha demostrado ser una tecnología clave para la descarbonización y la eficiencia energética en España. Según varios informes de mercado elaborados por la Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización [14], en adelante AFEC, en 2023 el mercado de bombas de calor en España continuó su crecimiento. Aunque dicho crecimiento fue más atenuado que en el anterior ejercicio, se sigue evidenciando el auge de esta tecnología.

A continuación, se recoge en la Tabla 2 algunos datos representativos durante el 2023. Destaca de manera especial las ventas totales de bombas de calor, las cuales alcanzaron un total de 209.599 unidades, representando un incremento del 14,21% respecto al año anterior.

Tabla 2: Datos estadísticos de las bombas de calor en 2023 en España.

Unidades vendidas	2023	% 2023/2022	2022	% 2022/2021	2021
Aire-aire reversible	119.021	31,60%	90.439	6,79%	84.691
Aire-agua reversible	66.762	-4,29%	69.755	42,93%	48.802
Agua-agua reversible	130	-24,86%	173	61,68%	107
ACS	23.686	2,32%	23.150	52,28%	15.202
Total	209.599	14,21%	183.517	23,33%	148.802

Elaboración propia a partir de [14].

Aunque hubo un crecimiento en las ventas de bombas de calor en España en 2023, existen desafíos importantes, como la competencia de las calderas de gas, los fondos regionales para la sustitución de calderas, y la necesidad de seguir innovando en tecnología. Otro reto clave es la baja tasa de renovación de edificios, que es de solo el 0,1%, muy por debajo del objetivo establecido por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC). Esta lenta tasa de renovación limita el progreso. [15]

3.2.2 POLÍTICAS A NIVEL NACIONAL Y EUROPEO

El crecimiento que ha experimentado el mercado de las bombas de calor viene dado por diversos motivos, como las políticas y regulaciones impulsadas desde la Unión Europea. La difusión de las bombas de calor es fundamental para lograr la neutralidad de carbono en línea con los objetivos marcados en el Pacto Verde Europeo.

Dentro del contexto político y legislativo europeo, todos los escenarios en los que se basan las propuestas legislativas del paquete Fit for 55, predicen un gran crecimiento de las bombas de calor en todos los sectores, especialmente en edificios. Este marco legislativo fomenta el uso de energías limpias, como lo indica la Directiva de Energías Renovables (DER) que busca un consumo total de estas energías del 42,5% para 2030 con carácter obligatorio. Además, la Directiva de Eficiencia Energética (DEE) obliga a reducir el consumo de energía en un 11,7% para 2030, incluyendo medidas que incentiven el uso de tecnologías más eficientes como las bombas de calor. Por su parte, la Directiva sobre Eficiencia Energética de los Edificios (DEEE) requiere que los edificios sean más eficientes energéticamente, impulsando la instalación de bombas de calor para reducir el uso de combustibles fósiles. [14]

A nivel nacional, España ha alineado sus políticas energéticas con el marco legislativo europeo impulsado por la iniciativa RepowerEU, el cual busca acelerar la transición energética. Este plan propone la instalación de 10 millones de bombas de calor para 2026 en toda Europa, y un objetivo final de 60 millones para 2030 [16]. Además, se han implementado medidas clave como el Real Decreto 36/2023, que establece un sistema de Certificados de Ahorro Energético (CAEs), y la Orden TED/815/2023, que desarrolla este decreto parcialmente [14].

Este último concepto, el CAE, se presenta como un instrumento clave que certifica ahorros energéticos verificables logrados mediante la implementación de medidas de eficiencia energética. Este puede intercambiarse en el Sistema Nacional de Obligaciones de Eficiencia Energética para cumplir los objetivos legales del Fondo Nacional de Eficiencia Energética (FNEE) o transferirse a un sujeto delegado a cambio de una compensación económica. El CAE constituye un incentivo eficaz para impulsar la descarbonización y fomentar la implementación de medidas de eficiencia energética.

3.3 POBREZA ENERGÉTICA

3.3.1 DEFINICIÓN

Según la Estrategia Nacional Contra la Pobreza Energética 2019-2024 (ENPE) [17] aprobada por el gobierno el 5 de abril de 2019, la pobreza energética queda definida como aquella situación en la que se encuentra un hogar en el que no pueden ser satisfechas las necesidades básicas de suministros de energía, como consecuencia de un nivel de ingresos insuficiente y que, en su caso, puede verse agravada por disponer de una vivienda ineficiente en energía.

Este tipo de pobreza se manifiesta de diversas formas como lo puede ser la incapacidad de una familia en mantener en su vivienda a una temperatura adecuada, un retraso en el pago de las facturas, o un gasto económico en energía desproporcionado sobre los ingresos familiares. Estos fenómenos ponen de manifiesto cómo la pobreza energética no se limita de manera exclusiva a una mera cuestión económica, sino que se encuentra estrechamente relacionado con las condiciones de la vivienda y de las personas que viven en ella. Además, se observa el impacto desproporcionado que esta presenta sobre ciertos grupos vulnerables como lo son los hogares con bajos ingresos, ancianos o aquellos que viven en zonas con climas adversos [17].

De hecho, la Agencia Internacional de Energía (AIE) señala que la pobreza energética no solo afecta a cuestiones relacionadas con la calidad de vida, sino que también presenta implicaciones directas sobre la salud, al aumentar el riesgo de padecer enfermedades respiratorias y cardiovasculares derivadas de una exposición prolongada a temperaturas inadecuadas en el hogar [18]. Según un estudio realizado por la Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública, existe una mayor incidencia de mala salud (tanto física como mental) entre las poblaciones afectadas por la pobreza energética en la mayoría de los países analizados [19].

De manera análoga, la literatura académica también establece un grado de vinculación intrínseco entre este tipo de pobreza y la exclusión social, al verse aquellos que la experimentan marginados de ciertas dinámicas sociales y económicas [20].

3.3.2 MEDICIÓN

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta la pobreza energética consiste en su propia medición precisa, dado que no existe un consenso unánime sobre los indicadores más

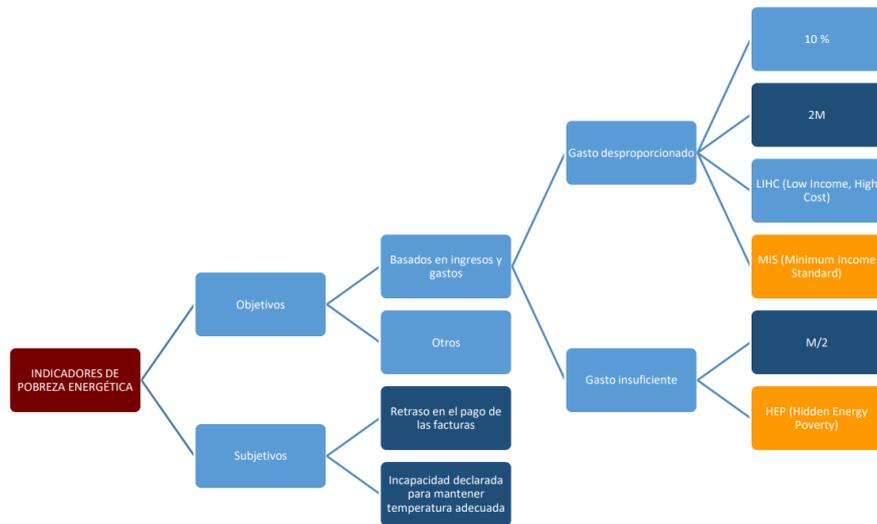
apropiados a la hora de medir y evaluar este fenómeno social [21]. Muchos estudios académicos hablan del concepto de “gasto desproporcionado” [22], definido como el porcentaje del ingreso que queda destinado al consumo energético. Otros prefieren emplear enfoques más integrales que consideren de manera adicional el confort térmico y las condiciones estructurales de la vivienda [23].

Según la Cátedra de Energía y Pobreza de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) [24], algunos de los indicadores más relevantes de cara a la medición de este fenómeno son:

- *10%*: un hogar se considera en pobreza energética si destina más del 10% de sus ingresos en la cobertura de costes asociados a la energía.
- *2M*: un hogar se encuentra en pobreza energética si su gasto energético es superior al doble de la mediana nacional.
- *Low Income High Cost (LIHC)*: en el caso de que un hogar presente sus ingresos por debajo del 60% de la mediana nacional después de deducir los gastos energéticos y si además sus costes energéticos se encuentran por encima de la mediana nacional, se considera el hogar pobre energético.
- *Indicador de gasto insuficiente (M/2)*: si un hogar gasta menos de la mitad de la mediana nacional en energía debido a su incapacidad para pagar más, entonces se considera que sufre pobreza energética.

Los indicadores comentados se basan en datos cuantitativos y cualitativos recogidos a través de encuestas y análisis estadísticos. Esto permite realizar una evaluación integral de la pobreza energética para el conjunto de hogares de una población. Gracias a estos indicadores, y otros como el Low Income Low Energy Efficiency (LILEE), el Minimum Income Standard (MIS), el retraso en el pago de las facturas o la incapacidad declarada de mantener el hogar con una temperatura adecuada, entre otros, se puede determinar finalmente si un hogar se encuentra en una situación de pobreza energética. En la Figura 4 se observa una clasificación de los indicadores de mayor relevancia según el Informe de Indicadores de Pobreza Energética en España 2022 [24].

Figura 4: Clasificación de los indicadores de pobreza energética más relevantes.



Obtenido de [24].

3.3.3 POLÍTICAS NACIONALES

La Estrategia Nacional Contra la Pobreza Energética 2019-2024 [17] impulsada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), establece un marco integral para combatir este problema en España. Esta se encuentra fundamentada en políticas en materia de protección social, mejora de la eficiencia energética, así como la concienciación pública, de tal manera que se mejore la calidad de vida de miles de familias en España. A grandes rasgos esta estrategia tiene como objetivo final reducir la pobreza energética en al menos un 25% para 2025, buscando alcanzar una reducción del 50% en el largo plazo.

Esta estrategia gira en torno a cuatro ejes: mejorar el conocimiento y la evaluación de la pobreza energética, reducir el impacto de este tipo de pobreza en el corto plazo, mejorar la eficiencia energética en las viviendas e incrementar la concienciación y educación sobre esta pobreza.

Dentro de las medidas de mejora de la eficiencia energética promovidas, se incluye el fomento de tecnologías que ayuden a reducir el consumo energético en hogares vulnerables. Un ejemplo clave son las bombas de calor, las cuales son objeto de estudio en este trabajo.

3.4 MODELO DE DESCARBONIZACIÓN ENERGÉTICA EN ESPAÑA

3.4.1 INTRODUCCIÓN AL MODELO OPENMASTER

Este proyecto empleará el modelo openMASTER, desarrollado por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas. Este se presenta como una herramienta fundamental para este trabajo de cara a la realización del análisis de la senda de descarbonización que tendrá lugar en España, con especial énfasis en el impacto que tendrán las bombas de calor sobre las familias más vulnerables. OpenMASTER se basa en la plataforma Pyomo, un lenguaje de modelado de optimización de código abierto, a su vez, basado en Python. El modelo destaca por ser una herramienta de equilibrio parcial dinámico y de programación lineal, el cual permite realizar una planificación energética a largo plazo. Su objetivo principal consiste en la optimización de la oferta energética dada una serie de restricciones técnicas y políticas. Entre sus objetivos principales destacan la minimización de los costes económicos del suministro energético, la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y los costes intangibles relacionados con el bienestar de la ciudadanía y las implicaciones sociales de las políticas energéticas. [25]

El modelo se estructura en torno a un sistema de procesos y flujos que abarca toda la cadena de valor del sector energético, tal y como se detalla en el Anexo I. Desde la energía primaria hasta su conversión y almacenamiento para su uso final. Este trabajo se centrará especialmente en los bloques finales Supply Technologies y Energy Services, ya que son los más relevantes en relación con la bomba de calor. [25]

- *Supply Technologies (ST)*: este bloque representa a todas las tecnologías encargadas de la transformación de la energía obtenida y almacenada en energía útil para el usuario a través de los servicios energéticos. Algunas de sus variables más importantes: $vQSTOut$ (cantidad de energía suministrada) y $vEmiCO2ST$ (emisiones de CO₂ durante el suministro de energía).
- *Energy Services (ES)*: este bloque convierte la energía suministrada por las tecnologías de suministro, pertenecientes al bloque *ST*, en servicios energéticos útiles para los consumidores finales pertenecientes a distintos sectores como el transporte, residencial, comercial e industrial. Algunas de sus variables más importantes son: $vQES$ (servicio

energético entregado), AF_{Oth} (factor de actividad residencial), $vQSD_{Oth}$ (demanda de servicio para el sector residencial), DC_{Oth} (caracterización de la demanda residencial), DM_{OthHE} y DM_{OthLE} (viviendas de alta eficiencia y viviendas de baja eficiencia).

OpenMASTER permite la evaluación exhaustiva de distintas tecnologías como las bombas de calor, identificando las decisiones óptimas de inversión y operación para el despliegue masivo de esta tecnología en el sistema energético español. Esto permitirá proyectar cuantitativamente el impacto de las bombas de calor en la transición energética en España con un horizonte temporal que se extiende hasta 2050. [25]

3.4.2 PARTICULARIDADES DE LA HERRAMIENTA

Uno de los aspectos más valiosos de la herramienta es su granularidad tecnológica. El modelo permite reflejar con precisión el proceso de innovación tecnológica dentro del sistema energético. Gracias a esta característica se puede modelar cómo se irán introduciendo versiones más eficientes de bombas de calor con el transcurso del tiempo, mientras se procede a la retirada de aquellas tecnologías con una menor eficiencia. Esto es posible gracias a su capacidad para modelar el *vintage* tecnológico, es decir, el modelo tiene en cuenta el año de fabricación de cada tecnología y su impacto en la eficiencia y las emisiones.

Además, openMASTER también incorpora las alteraciones en la conducta de los usuarios de forma endógena y lineal, permitiendo considerar hábitos de consumo más eficientes y responsables influyendo en la demanda energética. En el contexto de las bombas de calor, este enfoque permite simular escenarios más realistas, considerando cómo las decisiones de los usuarios finales pueden afectar a la demanda energética y, por ende, a las emisiones.

Finalmente, otra de las particularidades del modelo es su capacidad para cuantificar las emisiones asociadas, no solo en términos de CO_2 , sino que también en otros contaminantes clave como el NO_x , SO_x y partículas $PM_{2.5}$. Gracias a este cálculo de emisiones a través del modelo, se puede determinar el potencial concreto que presenta la bomba de calor a la hora de alcanzar la neutralidad climática, así como los hitos intermedios planteados en el PNIEC [3].

3.4.3 FORMULACIÓN MATEMÁTICA Y RESTRICCIONES DEL MODELO

A continuación, se resume la formulación matemática de la función objetivo y las restricciones más significativas del modelo aplicadas en el sector residencial para evaluar el impacto de las bombas de calor en la transición energética: [25]

I. Función objetivo

Coste total del sistema [G€]: la función objetivo busca minimizar el coste total del sistema energético, incluyendo los costes económicos de operación e inversión, las penalizaciones por exceder límites de emisiones y las medidas de comportamiento que modulan la demanda energética. Adicionalmente, se incluye un componente en la función el cual garantiza el cumplimiento del presupuesto de emisiones de CO₂. La formulación de la función objetivo se expresa de la siguiente manera:

$$vSysCost = \sum_y vTotalCost_y + \sum_y vPenalCost_y + \sum_{BM,y} vBMCost_{BM,y} + \sum_{DM,y} vDMCost_{DM,y}$$

Donde:

- $vSysCost$ [G€]: coste total del sistema energético en el periodo considerado.
- $vTotalCost_y$ [G€]: coste total en el año y . Recoge todos los costes relevantes en ese año.
- $vPenalCost_y$ [G€]: coste anual de penalización en el año y . Se refiere a los sobrecostes por incumplir ciertas restricciones o condiciones del sistema en ese año.
- $vBMCost_{BM,y}$ [G€]: coste anual de la implantación de las medidas de comportamiento, *Behavioral Measures (BM)*, o aquellas acciones o estrategias para modificar los patrones de consumo, en el año y .
- $vDMCost_{DM,y}$ [G€]: coste de las medidas de ajuste de demanda, destinadas a equilibrar la producción y el consumo de energía a lo largo del año.

La función objetivo considera conjuntamente los costes directos del sistema y los costes de penalización y comportamiento. Con ello busca optimizar la inversión y operación de las distintas tecnologías, garantizando además el cumplimiento de los distintos hitos de cara a poder alcanzar la neutralidad climática.

II. Restricciones

El modelo openMASTER incluye además una serie de restricciones que aseguran la viabilidad técnica y económica de todo el sistema energético, además de garantizar el cumplimiento de los objetivos medio ambientales. Dentro del contexto de las bombas de calor, se detallan a continuación las más relevantes:

Balance Energético para los servicios energéticos (ES) [Uds. ES]: el objetivo es garantizar el equilibrio entre la oferta y demanda de energía final para los servicios energéticos. La formulación asegura que toda la energía suministrada por las tecnologías del bloque *ST* sea igual o mayor a la demanda ajustada de servicios. Se tiene en consideración posibles pérdidas o deficiencias en el suministro.

$$\sum_{vin} vQSTOut_{ST,ES,vin,y,s,d,h} \geq vQES_{ST,ES,y} \cdot pESLoad_{ES,s,d,h} - vQESNS_{ST,ES,y,s,d,h}$$

Emisiones Totales Anuales de CO₂ [MtCO₂]: esta ecuación estima las emisiones totales anuales de CO₂ en el sistema. Para ello suma las emisiones provenientes de los Centros Energéticos (*CE*), Tecnologías Energéticas (*TE*), Servicios Energéticos (*ES*) y Sistemas de Almacenamiento (*ST*). Este cálculo es fundamental para el control de las emisiones totales, permitiendo establecer la comparativa con los presupuestos de emisiones y garantizar así el cumplimiento de las políticas de reducción de emisiones.

$$vEmiCO2Tot_y = \sum_{CE} vEmiCO2CE_{CE,y} + \sum_{TE} vEmiCO2TE_{TE,y} + \sum_{ST,ES} vEmiCO2ST_{ST,ES,y}$$

Límite máximo de emisiones de CO₂ [MtCO₂]: esta fórmula garantiza que las emisiones totales del sistema se mantengan dentro del presupuesto de carbono establecido. Para cumplir esto, el término *pEmiCO2Cap_y*, que representa el límite máximo de emisiones anuales, debe ser mayor o igual a las emisiones totales del sistema, calculadas como la diferencia entre las emisiones reales del sistema *vEmiCO2Tot_y*, menos cualquier exceso permitido de emisión sobre el límite establecido *vEmiCO2CapExc_y*.

$$pEmiCO2Cap_y \geq vEmiCO2Tot_y - vEmiCO2CapExc_y$$

Límite en el presupuesto de emisiones CO₂ [MtCO₂]: esta restricción asegura que las emisiones acumuladas no excedan el presupuesto de carbono establecido para el periodo considerado. Para ello el parámetro $pEmiCO2Budget_y$, representa el presupuesto total de emisiones permitido para ese año y, debe ser mayor o igual a la suma de las emisiones totales acumuladas en el sistema. Estas son ajustadas por un factor de diferencia de años, $pYrGap$, y se substraen cualquier exceso permitido mediante la variable $vEmiCO2CapExc_y$.

$$pEmiCO2Budget_y \geq pYrGap \cdot \sum_y vEmiCO2Tot - vEmiCO2CapExc_y$$

Límite de emisiones de CO₂ para los sectores residencial y comercial [MtCO₂]: esta restricción garantiza que las emisiones en los sectores residencial y comercial se mantengan dentro de los límites permitidos.

$$pEmiCO2CapOth_y \geq \sum_{STOth} (vEmiCO2ST_{STOth,y}) - vEmiCO2CapOthExc_y$$

Aunque existen otras restricciones que regulan el comportamiento del modelo y que fundamentan el cumplimiento de los distintos objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética, la formulación matemática detallada del modelo se puede consultar bajo el interés del lector en la bibliografía adjunta [25], donde se incluyen todas las ecuaciones y restricciones aplicados. Aunque el modelo openMASTER incluye otras muchas restricciones las cuales regulan aspectos de sostenibilidad y eficiencia energética, las mencionadas son fundamentales de cara dentro del contexto de estudio.

3.4.4 PARAMETRIZACIÓN DE LA BOMBA DE CALOR

Dentro del modelo, y centrándose únicamente en lo relativo a la bomba de calor, se recogen dos tecnologías de bomba: Heat Pump COP 3 y Heat Pump COP 6. La diferencia entre estas dos tecnologías reside en el COP asociado a cada una, siendo la eficiencia energética mayor cuanto mayor sea el COP. Además, se contemplan tres posibles usos finales para la bomba de calor: calor residencia, refrigeración y agua caliente sanitaria.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantean seis combinaciones finales dentro del bloque de Servicios Energéticos (SE). Dentro de las especificaciones del modelo se incluye las eficiencias energéticas en GWh por unidad de servicio energético para cada una de las combinaciones. Las

emisiones de CO₂ por MWh, para ambas tecnologías, se han considerado nulas, al asumir que están alimentadas por energías de origen 100% renovable. Lo mismo ocurre para las emisiones de NO_x y SO_x.

Por otro lado, el modelo considera que estas tecnologías presentan una capacidad instalada constante desde el 2005 al 2020 de 24,4 y 6,1 unidades *ST* para las bombas de calor COP 3 y COP 6 respectivamente. En cuanto al CAPEX ambas bombas de calor, para el año 2020 se estima en 1.377 y 2.066 millones de euros por unidad *ST* para la COP 3 y COP 6, con una proyección que prevé una disminución de estos valores hasta 800 y 1.200 para el año 2050.

Uno de los aspectos más relevantes en la parametrización es la eficiencia energética, la cual comienza con un valor en 2005 de 0,34 y de 0,17 para COP 3 y COP 6 respectivamente, y se estima que disminuirá hasta un valor de 0,31 y de 0,16 en 2050. Se entiende por eficiencia energética como la energía consumida necesaria para producir una unidad de energía final.

Otro parámetro de gran interés dentro del modelado de la bomba de calor es la probabilidad acumulada de desmantelamiento, entendida como la probabilidad de que una tecnología sea retirada a lo largo de un periodo de tiempo. Esta probabilidad se incrementa conforme envejece la tecnología, reflejando el riesgo acumulado de que deje de ser operativa debido a factores como la obsolescencia, desgaste o sustitución por tecnologías más eficientes. Para ambas, se aplica un patrón uniforme de desmantelamiento que comienza en un 0% en el año base y aumenta progresivamente: 10% a los 5 años, 30% a los 10 años, 55% a los 15 años, 80% a los 20 años, alcanzando el 100% a partir de los 25 años.

Por otro lado, en cuanto a los costes asociados a la operación y mantenimiento, estos se han considerado nulos. Para mejorar el modelado relativo a la bomba de calor será necesario establecer unos costes realistas y que se correspondan con el estado actual y esperado.

En la versión actual del modelo, la parametrización de la bomba de calor no cuenta con el nivel de detalle suficiente como para ofrecer una imagen fiel del papel potencial de esta tecnología dentro de la transición energética, especialmente su rol crítico en las familias más vulnerables. Uno de los objetivos recogidos en este trabajo, es la mejora en la parametrización y nivel de detalle de la bomba de calor, lo que incluye el reemplazo de las tecnologías anteriores por otras que reflejen mejor las diferencias en operación y eficiencia de estas en el largo plazo.

Capítulo 4. METODOLOGÍA EMPLEADA

En este capítulo se detallará la metodología empleada para realizar la mejora en la parametrización de la tecnología de la bomba de calor dentro del modelo openMASTER. El objetivo de esta actualización es poder proporcionar una representación más realista y detallada de las características tecnológicas, económicas y operativas de la bomba de calor. A lo largo de este capítulo se explicará de manera precisa las distintas hipótesis y criterios seguidos para la mejora en el cálculo de los parámetros asociados a esta tecnología. Más adelante se analizará cómo la nueva parametrización permite una mejor evaluación del impacto de esta tecnología sobre los hogares más vulnerables, considerando el contexto actual y las proyecciones futuras del desarrollo de esta tecnología.

4.1 FUENTES Y TRATAMIENTO DE DATOS

Para la mejora en la parametrización de la bomba de calor dentro del modelo openMASTER, se ha utilizado como base sobre la que trabajar el portal de estadísticas de bombas de calor proporcionado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Esta plataforma ofrece de manera pública una recopilación exhaustiva de datos para esta tecnología desde 2014 hasta 2022 con foco en España [26].

La plataforma estadística del IDAE organiza su base de datos para la bomba de calor en diversas categorías, facilitando así la posibilidad de aplicar filtros específicos:

- *Tipo de bomba de calor:* dentro de esta clasificación se diferencia entre bombas de calor aerotérmicas, geotérmicas e hidrotérmicas, en función del medio del que se obtenga la energía primaria.
- *Fuente energética y medio de distribución:* se distingue el tipo de fluido y medio de distribución empleado, tales como sistemas aire-aire, aire-agua, tierra-agua, entre otros.
- *Sector de aplicación:* esta categoría incluye sectores como la residencia, el industrial, el transporte, etc.
- *Año de implementación:* la base de datos proporciona una perspectiva temporal, ya que abarca un periodo anualizado desde el 2014 hasta el 2022.

Estos datos también incluyen a su vez una serie de parámetros técnicos, clave para la evaluación del rendimiento y operación de las bombas de calor en cada periodo de estudio:

- *Número de plantas instaladas*: clasificado por tipo de bomba y sector de aplicación, permitiendo un análisis detallado de su distribución y alcance.
- *Potencia térmica instalada (kWt)*: representa la capacidad instalada de los sistemas en cada sector y aplicación.
- *Producción térmica anual (tep)*: indicador clave para reflejar la energía térmica generada.
- *Consumo eléctrico anual (MWh)*: este indicador permite evaluar la electricidad consumida.
- *SPF (Seasonal Performance Factor)*: indicador de rendimiento estacional el cual mide la eficiencia de las bombas de calor en función de las condiciones estacionales. Es esencial para entender el comportamiento de la bomba de calor en diferentes climas y estaciones.
- *Consumo de Energías Renovables (EERR)*: muestra la contribución de las bombas de calor al uso de energías renovables.

Cabe destacar que los datos recogidos constan únicamente de dos tecnologías: la bomba de calor aerotérmica (aire-aire) y la bomba de calor geotérmica. Esto se debe a que, aun proporcionando una visión completa del parque de bombas de calor en el territorio nacional, este se compone mayoritariamente de estas dos tecnologías.

Las fuentes de información que han respaldado la creación de esta base de datos son diversas. Para los datos de la bomba de calor aerotérmica destaca la Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización (AFEC) y las comunidades autónomas. En el caso de la bomba de calor geotérmica destaca la colaboración de las CCAA, Organismos de Cuenca y Consejos Insulares y el Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España del CSIC y diferentes asociaciones y empresas presentes en la cadena de valor.

Además de la base de datos del IDAE, se ha utilizado de manera complementaria el informe “*Síntesis del Estudio Parque de Bombas de Calor en España*” [27] elaborado también por el IDAE. Dicho informe se redactó en respuesta a la Directiva 2009/28/EC del Parlamento Europeo y el Consejo, que promueve el uso de energía procedente de fuentes renovables. Según esta directiva, los estados miembros deben calcular el aporte de estas energías renovables y reportarlo a Eurostat. Destaca el potencial que presenta la bomba de calor en la captura de la energía de fuentes renovables y el cumplimiento de estos requisitos. En este contexto, el IDAE

realizó una encuesta entre julio y diciembre de 2014, abarcando una muestra representativa de hogares y comercios. Gracias a dicha encuesta y mediante métodos estadísticos se pudo caracterizar y cuantificar de manera aproximada el parque de bombas de calor en España.

De dicho informe específicamente se extrajeron los datos históricos del desglose de bombas de calor en España según su COP y su año de instalación. Los datos estaban organizados en lustros, correspondientes a los intervalos: 1990-1994, 1995-1999, 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014. Además, se incluía una categoría “Ns/Nc” para aquellos equipos cuya fecha de instalación no se encuentra disponible.

Gracias a esta segunda fuente, fue posible aportar un mayor detalle a la anterior fuente proporcionando un desglose más detallado de las bombas instaladas según COP.

Finalmente, otra gran fuente empleada ha sido el informe *“Decarbonising Home Heating: An Evidence Review of Domestic Heat Pump Installed Costs”* [28] elaborado por el UK Energy Research Centre. Esta fuente proporciona datos históricos sobre los costes de instalación anualizados, tanto para las bombas de calor aerotérmicas como para las geotérmicas. Gracias a la obtención de estos costes de instalación para ambas tecnologías, se pudo más adelante analizar su evolución a lo largo del tiempo extrapolando el contexto del Reino Unido a España.

La consulta y apoyo sobre estas distintas fuentes de información ha sido fundamental para implementar una actualización de la tecnología de la bomba de calor en el modelo openMASTER. Esto ha permitido lograr una más detallada y realista parametrización, la cual refleja su desempeño pasado, actual y potencial al considerar el contexto desarrollo tecnológico proyectado para los próximos años.

4.2 PROYECCIÓN DE DATOS

Para poder reflejar una imagen realista del potencial de esta tecnología se han empleado distintos métodos estadísticos para la extrapolación de los datos. Se entiende por extrapolación de datos aquella metodología que permite estimar valores futuros y pasados mediante la reconstrucción de tendencias pasadas en función de los datos disponibles. Uno de los métodos más útil teniendo en cuenta la naturaleza de los datos es el caso de la extrapolación lineal, donde

el crecimiento o decrecimiento se asume con una tasa constante. Esto es especialmente útil en proyecciones de datos a corto plazo o en situaciones donde no se esperan cambios bruscos de tendencia [29]. Esta técnica es relativamente sencilla de implementar y permite una aproximación sencilla basada en la pendiente de una recta ajustada a datos históricos [30].

De manera análoga, otro método de gran utilidad es la extrapolación cuadrática, ya que permite capturar tendencias de un grado de complejidad superior en las que el crecimiento/decrecimiento presenta una variación en su crecimiento/decrecimiento [31]. Como es el caso del uso de tecnologías más eficientes, donde su adopción inicial puede ser lenta pasando a crecer rápidamente con el tiempo. Además, existen otros métodos para estimar la tendencia de los datos como la función exponencial o logarítmica que, según las expectativas de la variable concreta en el futuro, pueden ser de gran utilidad en la estimación de sus proyecciones.

Ambas metodologías empleadas han permitido obtener una visión robusta y flexible sobre las tendencias tanto futuras como pasadas a partir de los datos históricos recogidos. Esto ha facilitado abordar posibles escenarios, dotando de mayor precisión la proyección del uso de las bombas de calor en el sector residencial, adaptándose así a diferentes expectativas en el consumo y eficiencia, entre otros parámetros clave.

4.3 IMPLEMENTACIÓN EN LA HERRAMIENTA OPENMASTER

El proceso de implementación de la nueva parametrización en la herramienta openMASTER se centra en integrar de manera precisa y detallada los parámetros actualizados de las bombas de calor, tanto aerotérmicas como geotérmicas. En primer lugar, se llevó a cabo una recopilación exhaustiva de los datos históricos y la elaboración de proyecciones futuras. Se busca, por tanto, recopilar información de parámetros clave como el SPF, el COP, el CAPEX, el OPEX y la capacidad instalada, entre otros.

A partir de estos datos, se integra la nueva parametrización dentro de la estructura de openMASTER utilizando los módulos correspondientes para el análisis de tecnologías de suministro en el sector residencial. El modelo debe ajustarse para incorporar no solo los datos

históricos, sino también los límites de capacidad máxima y las proyecciones de penetración tecnológica a lo largo del horizonte temporal estudiado (2020-2050).

Los resultados finales, se obtienen mediante un proceso iterativo partiendo de un conjunto de simulaciones iniciales para verificar la coherencia de los resultados según los escenarios planteados y los objetivos de descarbonización establecidos. En el horizonte 2030, dichos objetivos están definidos por el PNIEC [3], mientras que las metas a 2050, incluidas cuantitativamente en el modelo, están alineadas con la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo [4], diseñada para cumplir con los compromisos del Acuerdo de París [32].

Capítulo 5. APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

Como se describía en el capítulo de los objetivos, este trabajo busca investigar y evaluar el papel de las bombas de calor en el proceso de descarbonización del sistema energético en España, así como su impacto potencial en términos económicos y sociales.

Para ello es necesario recopilar datos históricos y realizar proyecciones y estimaciones de los principales parámetros que definen el comportamiento de la tecnología de la bomba de calor. Obtenidos estos datos, se busca integrarlos dentro del actual modelo openMASTER, creando una imagen fiel y actualizada de esta tecnología, y posteriormente analizar los resultados obtenidos desde distintas perspectivas.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES EMPLEADAS

Se detalla en esta sección, las variables que se han considerado a la hora de evaluar el potencial de la bomba de calor en el contexto de estudio planteado. Los valores de las siguientes variables han sido recopilados tanto para la tecnología de la bomba de calor aerotérmica como geotérmica, en línea con la base de datos del parque de bombas de calor histórico en el territorio nacional recogido según el IDAE [26].

Las variables que se presentan son diversas y abarcan aspectos técnicos, energéticos y económicos. Estas son fundamentales a la hora de poder cuantificar el rendimiento y la viabilidad de la bomba de calor a través del modelo openMASTER. Gracias a una comprensión detallada de cada variable se podrá posteriormente entender el alcance de esta tecnología en términos de eficiencia y costes. A continuación, se ofrece para cada variable una breve descripción.

I. Variables de capacidad e infraestructura

- *Número de plantas [unidades]:* representa la cantidad total de bombas de calor instaladas, reflejando el parque de bombas de calor renovables en el territorio nacional para un determinado año. Este valor es importante para conocer la tendencia a grandes rasgos en el ámbito nacional.

- *Potencia térmica [kWt]*: esta variable representa la capacidad térmica total del parque de bombas de calor para un determinado año. La potencia térmica es un indicador directo de la cantidad de calor que el sistema puede generar. También muestra la capacidad del sistema para satisfacer la demanda térmica.
- *Potencia térmica media [kWt]*: se calcula la potencia media como el cociente entre la potencia térmica total entre el número de plantas operativas en un determinado año. Esta variable presenta gran utilidad a la hora de evaluar el rendimiento energético en condiciones normales.

II. Variables de eficiencia y rendimiento

- *Horas de operación [horas]*: variable referida a las horas de funcionamiento anuales para una bomba de calor operando en modo calefacción.
- *Coficiente de rendimiento (COP)[adimensional]*: este coeficiente expresa la relación entre la potencia térmica generada por la bomba de calor frente a la potencia eléctrica consumida. En este estudio se contemplan distintos valores de COP para captar la variedad tecnológica, así como su grado de madurez. A valores más elevados de COP mayor será la eficiencia de la bomba.
- *Factor de rendimiento medio estacional (SPF) [adimensional]*: este indicador calculado a partir del COP nominal considera el rendimiento a lo largo de un periodo de tiempo a diferencia del COP. Para ello tiene en cuenta variaciones de temperatura, mediante un factor de ponderación según la zona climática donde se encuentre la instalación, y condiciones reales de operación, corregidas según un factor de corrección. En este estudio se contemplan distintos valores de SPF según la tecnología y su grado de madurez. A valores más elevados de SPF, mayor será la eficiencia del sistema.

III. Variables de producción y consumo energético

- *Producción térmica [tep]*: esta variable mide la cantidad de calor generado por el parque de bombas de calor en operación, expresado en unidades equivalentes a toneladas de petróleo. Gracias a esta variable se puede evaluar el rendimiento energético de manera comparable y estandarizada al comprender el aporte del calor generado en términos de energía fósil equivalente. Esta variable presenta un factor de conversión de 11,63 MWh por cada unidad de tep.

- *Producción térmica [MWh]*: esta variable mide la cantidad de calor producido por el parque de bombas de calor en operación, expresada en megavatios hora.
- *Consumo eléctrico [MWh]*: esta variable recoge la cantidad total de energía consumida por el sistema de bombas de calor de manera anualizada.
- *Consumo de energía renovable (EERR) [tep]*: cantidad de energía renovable empleada por el parque de bombas de calor, expresada en toneladas equivalentes de petróleo. Esta variable es especialmente relevante en proyectos enfocados en sostenibilidad y transición energética.

IV. *Variables económicas*

- *CAPEX [€]*: coste de inversión inicial requerido para realizar la instalación del sistema, incluyendo además del coste de la tecnología, costes como componentes auxiliares, la mano de obra y cualquier mejora en la estructura o sistema de calefacción del edificio.
- *CAPEX [€/kW]*: se refiere al coste de inversión inicial por cada kilovatio de capacidad instalada del sistema. Esta métrica es clave a la hora de poder establecer comparativas con otros sistemas de calefacción y la realización de análisis de viabilidad económica.
- *OPEX [€/kWh]*: esta variable representa los costes operativos asociados al funcionamiento de las bombas de calor por cada kWh de energía térmica generada. Incluye gastos como el mantenimiento, consumo eléctrico y otros posibles costes recurrentes necesarios para mantener el sistema en operación.
- *LCOH [€/MWh]*: esta métrica económica mide el coste total por unidad de energía térmica generada a lo largo de la vida útil de un sistema de generación de calor. Para su cálculo se consideran todos los costes involucrados, incluyendo la inversión inicial, los costes asociados a la operación y mantenimiento, el suministro eléctrico, etc., distribuidos de manera uniforme sobre la cantidad total de calor producido por el sistema a lo largo de su vida útil.

V. *Variables de capacidad máxima*

- *Número de hogares*: esta variable representa el límite superior de bombas de calor aerotérmicas que se pueden instalar para cada periodo, asumiendo que por cada hogar se instala una bomba de calor.

- *Número de viviendas completadas*: esta variable representa el límite superior de bombas de calor geotérmicas que se pueden instalar para cada periodo, asumiendo que únicamente se instalan bombas de calor geotérmicas en las viviendas de nueva construcción y no en las ya existentes debido a las dificultades tanto técnicas como económicas asociadas.
- *Capacidad máxima [GW]*: en base a las variables anteriores, y conociendo la potencia media asociada para cada tecnología en cada periodo, se estima la capacidad máxima. Esta variable permite ofrecer una visión más realista del potencial de la bomba de calor en España.

Gracias a la anterior descripción detallada de cada variable, se establece un marco conceptual completo para poder evaluar el impacto de esta tecnología en el contexto de estudio. La metodología empleada para su obtención, cálculo y modelado de cada uno de estos parámetros en el modelo openMASTER, se detallará en apartados posteriores proporcionando una comprensión clara de los fundamentos y su aplicación en el análisis.

5.2 PROYECCIONES REALIZADAS

En este apartado se comenta la metodología empleada en la realización de las proyecciones sobre el comportamiento futuro de las variables descritas anteriormente. Puesto que no se disponen de datos actualizados para todos los años incluidos en el periodo analizado por el modelo openMASTER, es necesario realizar proyecciones de cara a obtener una imagen fiel tanto del panorama actual como de las expectativas a futuro de estas tecnologías.

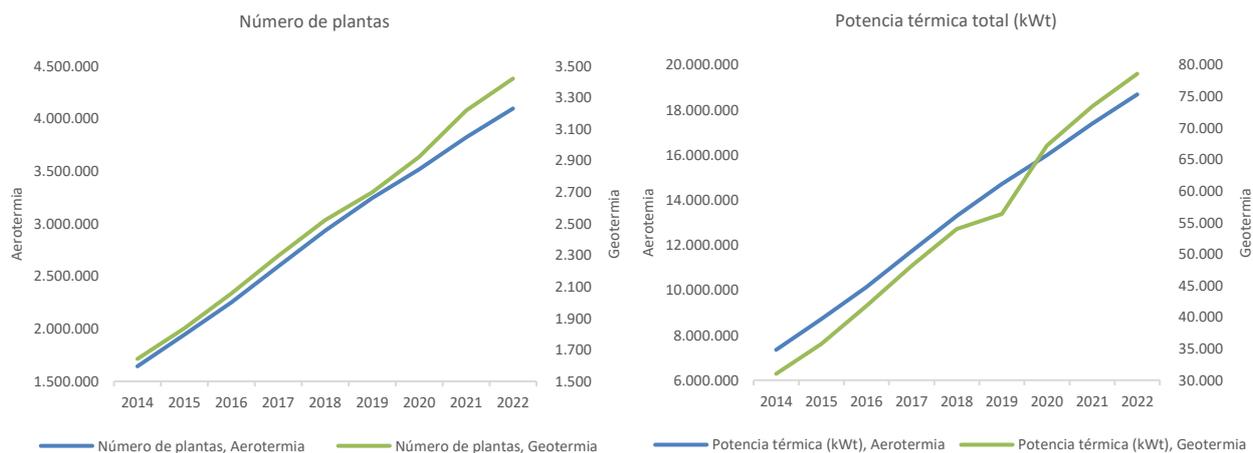
Dichas proyecciones se han basado en informes oficiales y datos sectoriales, pudiendo obtener de esta manera una visión fundamentada sobre las tendencias de implantación de la tecnología de la bomba de calor en España. Gracias a esta metodología se ha podido identificar patrones históricos y anticipar posibles escenarios futuros pudiendo comprender el papel que presentará esta tecnología en la descarbonización del sector residencial, así como la lucha contra la pobreza energética.

5.2.1 PROYECCIÓN DE LAS VARIABLES DE CAPACIDAD E INFRAESTRUCTURA

Según los datos estadísticos anuales recopilados por el IDAE [26] para el periodo 2014-2022, el parque de bombas de calor aerotérmicas en España pasó de 1.642.745 unidades en 2014 a 4.095.056 en 2022, lo cual representa un crecimiento medio anual del 12,16%. En contraste, el despliegue de bombas de calor geotérmicas es considerablemente menor, aumentando de 1.642 unidades en 2014 a 3.420 en 2022, con un crecimiento medio anual del 9,63%. En línea con la evolución del número de unidades se encuentra la potencia térmica total, la cual representa un crecimiento medio anual del 12,44% para la bomba de calor aerotérmica alcanzando casi los 19 GWt en 2022. Por otro lado, se observa una tendencia similar para el caso de la bomba de calor geotérmica en lo que se refiere el crecimiento medio anual superando los 78.585 kWt en 2022.

Para proyectar las variables en los períodos donde no se disponía de datos, se ha aplicado una tendencia de crecimiento lineal basada en los históricos comentados durante los periodos 2014-2022, como se muestra en la Figura 5. El aumento reflejado en una mayor potencia térmica total instalada, así como en el número de bombas de calor, permitirá a esta tecnología satisfacer una porción significativa de la demanda térmica residencial futura.

Figura 5: Datos históricos de la evolución del número de plantas y potencia térmica total.



Elaboración propia a partir de [26].

En cuanto a las proyecciones futuras obtenidas, el número de plantas aerotérmicas proyectado alcanza la cifra de 4,8 millones de unidades en 2024, 12,8 millones en 2050. Siendo su potencia térmica estimada en torno a los 22 GWt y 59 GWt respectivamente. En el caso de la bomba de

calor geotérmica, se observa un despliegue más conservador, pero manteniendo su tendencia de crecimiento constante. En 2024, se proyecta que el número de instalaciones alcance unas 3.850 unidades, con una potencia térmica cercana a los 90.000 kWt. Para el año 2050, se estima un crecimiento moderado, alcanzando aproximadamente las 9.650 unidades instaladas y una potencia térmica de casi 250.000 kWt. Estas proyecciones evidencian el potencial de ambas tecnologías, así como su contribución en transición energética.

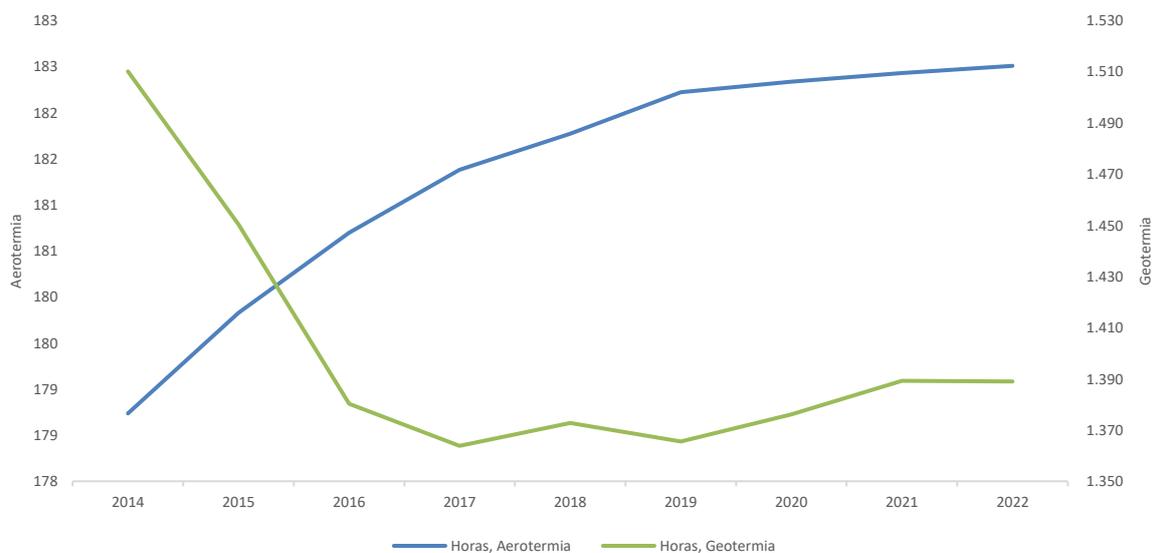
Los datos históricos y las proyecciones finales obtenidas se recogen de manera detallada en las Tablas 9 y 10.

5.2.2 PROYECCIÓN DE LAS VARIABLES DE EFICIENCIA Y RENDIMIENTO

I. Horas de operación

En cuanto a las horas de funcionamiento para la bomba de calor aerotérmica en modo calefacción según el IDAE [26] para el periodo 2014-2022, el parque de bombas de calor aerotérmicas en España presentó un valor medio de 179 horas en 2014 y 183 en 2022, señalando un crecimiento medio anual de 0,26%. En el caso de las bombas de calor geotérmicas, estas presentaron un valor medio de 1.510 horas en 2014 y 1.389 en 2022, y se observó un decremento medio anual de -1,02% tal y como se muestra a continuación en la Figura 6.

Figura 6: Evolución de las horas de funcionamiento para bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas.



Elaboración propia a partir de [26].

Las proyecciones futuras obtenidas para el número de horas proyectado alcanzan la cifra de 183 horas en 2024, 185 horas en 2050 y 186 en 2075 para las bombas aerotérmicas. Por otro lado, para las bombas de calor geotérmicas estas alcanzan la cifra de 1.416 horas en 2024, 1.554 horas en 2050 y 1.686 horas en 2075.

II. *Coficiente de rendimiento (COP)*

En cuanto a la proyección del COP, además de emplearse la base de datos del IDAE sobre el parque de bombas de calor en España [26], se ha utilizado de manera complementaria el informe “*Síntesis del Estudio Parque de Bombas de Calor en España*” [27] también elaborado por el IDAE. En dicho informe se recogen los datos históricos del desglose de bombas de calor en España según su COP, distinguiendo hasta seis rangos, y su año de instalación, tal y como se observa en la Tabla 3. Los datos se encuentran agrupados por lustros, abarcando los siguientes periodos: 1990-1994, 1995-1999, 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014, y una categoría “Ns/Nc” para aquellos equipos cuya fecha de instalación no se encuentra indicada.

Tabla 3: Evolución del COP del parque de bombas de calor por año de puesta en funcionamiento.

COP		1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	Ns/NC
1-2	Número	-	-	7.513	-	59	-
	Potencia	-	-	36.450	-	5.031	-
2-3	Número	351.823	392.834	841.206	147.868	12.977	59.976
	Potencia	1.893.637	2.062.495	7.505.106	1.633.998	375.856	2.709.483
3-4	Potencia	68.109	246.766	2.075.578	2.664.150	1.386.765	80.979
	Número	1.590.963	1.321.481	10.582.690	20.032.139	8.266.935	568.845
4-5	Número	5.583	689	142.826	1.086.420	1.486.016	31.127
	Potencia	16.748	5.809	6.174.808	4.879.844	6.909.158	142.044
5-6	Potencia	-	-	7	29.959	219.520	798
	Número	-	-	29	132.063	801.547	2.672
6-7	Número	-	-	-	-	2.693	7.483
	Potencia	-	-	-	-	6.193	17.211

Obtenido de [27].

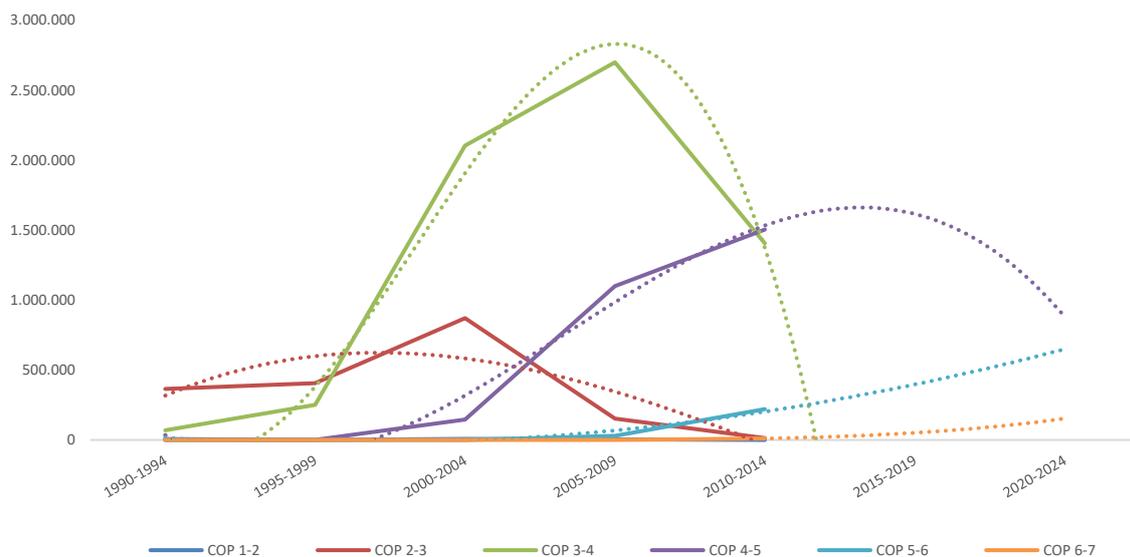
A partir de estos datos históricos, se busca obtener el desglose según COP para la bomba de calor aerotérmica a lo largo del periodo de estudio. Puesto que el IDAE ya proporciona datos sobre la evolución en número según el tipo de tecnología, estos datos son utilizados para obtener la evolución en términos porcentuales.

Debido a que estos datos únicamente recogen el desglose entre los años 1990-2014, es necesario proyectar los datos históricos. A la hora de realizar estas estimaciones se ha tenido en cuenta

que cuando una tecnología con un COP superior aparece, es decir, una tecnología con una eficiencia superior, la tecnología con COP inferior comienza su declive. Esta consideración supone que las proyecciones tienen en cuenta la obsolescencia tecnológica y la tendencia hacia el empleo de bombas con COPs superiores, tal y como se muestra en la Figura 7.

De esta forma, una vez conocidas estas distribuciones, se aplicarán al total de plantas y potencia del apartado 5.2.1, pudiendo así desagregar los datos según las distintas categorías de COP analizadas. Se recoge en la Tabla 4 tanto los datos históricos como las proyecciones calculadas teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas.

Figura 7: Número de bombas de calor en España según COP y tendencia observada.



Elaboración propia a partir de [27].

Las tendencias anteriores muestran de manera gráfica la hipótesis de obsolescencia tecnológica anteriormente mencionada. En el período 1990-1994, la distribución de las nuevas bombas puestas en funcionamiento refleja que un 83% de bombas presentan un COP 2-3, un 16% un COP 3-4 y un 2% un COP 4-5. Por otro lado, en el último período registrado, correspondiente a 2010-2014, la distribución del número de bombas puestas en funcionamiento muestra que menos del 1% corresponden a bombas con un COP 2-3, un 45% a bombas con un COP 3-4, un 48% a bombas con un COP 4-5, un 7% a bombas con un COP 5-6 y, nuevamente, menos del 1% a las bombas más eficientes, con un COP 6-7.

Tabla 4: Distribución histórica y proyecciones del parque de bombas de calor en España según COP y año de instalación.

COP	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034
1-2	Share Número	0,00%	0,24%	0,10%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Share Potencia	0,00%	0,14%	0,08%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2-3	Share Número	82,99%	27,85%	3,84%	0,43%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Share Potencia	58,26%	34,67%	7,18%	2,72%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3-4	Share Número	15,73%	67,28%	67,72%	44,56%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Share Potencia	41,31%	41,25%	74,27%	50,40%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4-5	Share Número	1,29%	0,11%	4,62%	47,70%	78,30%	52,37%	0,00%	0,00%
	Share Potencia	0,43%	0,15%	23,94%	41,88%	84,46%	42,94%	0,00%	0,00%
5-6	Share Número	0,00%	0,00%	0,00%	6,99%	19,23%	38,56%	72,93%	65,11%
	Share Potencia	0,00%	0,00%	0,00%	4,83%	14,38%	49,66%	80,95%	74,61%
6-7	Share Número	0,00%	0,00%	0,00%	0,32%	2,47%	9,07%	27,07%	34,89%
	Share Potencia	0,00%	0,00%	0,00%	0,14%	1,16%	7,39%	19,05%	25,39%

COP	2035-2039	2040-2044	2045-2049	2050-2054	2055-2059	2060-2064	2065-2069	2070-2075
1-2	Share Número	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Share Potencia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2-3	Share Número	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Share Potencia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3-4	Share Número	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Share Potencia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4-5	Share Número	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Share Potencia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
5-6	Share Número	57,81%	51,22%	45,37%	40,25%	35,79%	31,93%	28,57%
	Share Potencia	68,31%	62,27%	56,61%	51,40%	46,66%	42,39%	38,56%
6-7	Share Número	42,19%	48,78%	54,63%	59,75%	64,21%	68,07%	71,43%
	Share Potencia	31,69%	37,73%	43,39%	48,60%	53,34%	57,61%	61,44%

Elaboración propia a partir de [27].

Por otro lado, las expectativas futuras indican que, para el año 2050, la distribución del número de bombas puestas en funcionamiento estará repartida entre un 40% para las bombas con un COP de 5-6 y un 60% para las bombas con un COP de 6-7. En el último período proyectado, 2070-2075, esta distribución será menos equitativa, alcanzando las bombas con un COP de 6-7 su máximo, representando el 65% de manera aproximada. Estas cifras evidencian el cambio hacia tecnologías más eficientes y su papel creciente en el panorama de la climatización, refrigeración y obtención de ACS en el sector residencial.

A partir de estos porcentajes y conocido el número de bombas instaladas para cada año y tecnología, se obtiene el desglose según COP esperado, tal y como se recoge en el apartado 5.3.

Gracias a este desglose y para facilitar su integración en el modelo openMASTER aprovechando su característico modelado *vintage*, los resultados obtenidos se agrupan en las siguientes tecnologías para el caso de la bomba de calor aerotérmica:

- *Aeroterminia COP bajo*: este grupo incluye el total de las bombas de calor aerotérmicas cuyo COP se encuentra en los intervalos 1-2 y 2-3. El COP promedio de esta tecnología para cada periodo, se obtiene como la media ponderada a partir de las distribuciones según la potencia recogida en la Tabla 4. Esta tecnología presenta un número prácticamente nulo en todos los periodos debido a que para todos los periodos de estudio existían otras con una eficiencia superior. Los resultados se detallan en el apartado 5.3.
- *Aeroterminia COP medio*: este grupo incluye el total de las bombas de calor aerotérmicas cuyo COP se encuentra en los intervalos 3-4 y 4-5. El COP promedio de esta tecnología para cada periodo, se obtiene de manera análoga al COP bajo. Esta tecnología entra en declive, especialmente en los últimos períodos, debido a su progresivo reemplazo por bombas de calor con una eficiencia superior. De igual modo, los resultados se muestran en el apartado 5.3.
- *Aeroterminia COP alto*: este grupo incluye el total de las bombas de calor aerotérmicas cuyo COP se encuentra en los intervalos 5-6 y 6-7. El COP promedio de esta tecnología para cada periodo, se obtiene nuevamente como la media ponderada a partir de la distribución de potencia recogida en la Tabla 4. Su elevada penetración en los últimos períodos resalta su importancia durante las etapas finales del estudio. Los resultados se pueden consultar en el apartado 5.3.

- *Aeroterminia COP promedio*: esta tecnología recoge el total de las bombas de calor aerotérmicas, cuyo COP promedio para cada periodo analizado se obtiene como la media ponderada según la distribución en potencia en los distintos intervalos de COP. Esta tecnología es de gran relevancia a la hora de introducir el comportamiento futuro de la bomba de calor aerotérmica en el modelo openMASTER.

En cuanto a la bomba de calor geotérmica, su modelado en openMASTER se ha realizado a través de una única tecnología representando el conjunto de bombas antes estimado. El cálculo de la evolución del COP para esta tecnología se detalla más adelante. La parametrización de la bomba de calor geotérmica en una única tecnología se debe a que esta representa un número reducido en comparación con la bomba de calor aerotérmica, por lo que no es necesario capturar esa granularidad tecnológica a partir de los datos históricos.

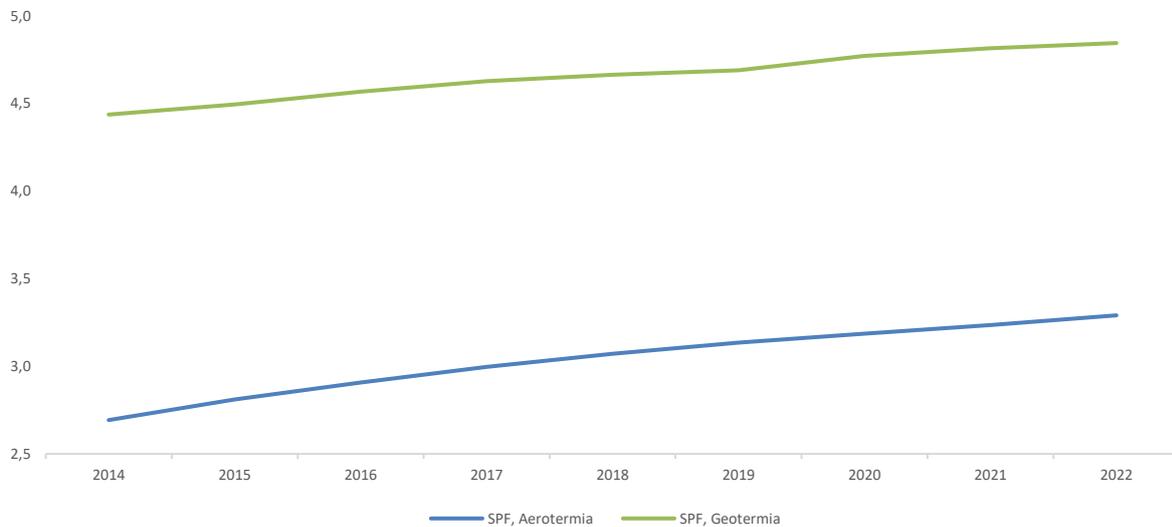
III. Factor de rendimiento medio estacional (SPF)

Para una evaluación más precisa de la eficiencia de una tecnología, se utiliza habitualmente el factor de rendimiento (SPF), ya que esta métrica contempla el rendimiento de la tecnología a lo largo de un período de tiempo. A diferencia del COP, que se limita a condiciones puntuales, el SPF tiene en cuenta las variaciones de temperatura, diferenciando entre distintas zonas climáticas y considerando las condiciones reales de operación de la instalación.

De igual modo para las variables de número y potencia anteriormente analizadas, el IDAE proporciona datos para el SPF para el periodo 2014-2022. Para obtener el valor del SPF en los periodos posteriores se ha proyectado a partir de los datos históricos disponibles.

El parque de bombas de calor aerotérmicas en España presentó un valor medio de 2,75 en 2014 y 3,33 en 2022 y se observó un crecimiento medio anual de 2,43%. En cuanto a las bombas de calor geotérmicas el factor de rendimiento medio estacional (SPF) presentó un valor de 4,44 en 2014 y 4,84 en 2022 y se observó un crecimiento medio anual de 1,11% tal y como se observa en la Figura 8. Las proyecciones futuras obtenidas para el factor SPF alcanzan las cifras de 3,47 en 2024 y 5,36 en 2050 para las bombas aerotérmicas. En el caso de las bombas geotérmicas ambas cifras alcanzan 4,96 en 2024 y 6,29 en 2050. Los datos históricos y las proyecciones finales obtenidas se recogen de manera detallada en el apartado 5.3.

Figura 8: Evolución del factor de rendimiento medio estacional según la bomba de calor.



Elaboración propia a partir de [26].

Como queda evidenciado en la anterior figura, la bomba de calor geotérmica demuestra un mayor potencial frente a la bomba de calor aerotérmica debido a su superior SPF en todos los períodos analizados. Esta ventaja se debe a la elevada eficiencia de esta tecnología ya que opera bajo condiciones de gran estabilidad térmica proporcionadas por la estabilidad de la temperatura del suelo, al contrario que las bombas de calor aerotérmicas, cuya eficiencia se ve afectada por las fluctuaciones en la temperatura ambiente.

Como se describía anteriormente, la bomba de calor aerotérmica se ha dividido en distintas tecnologías en función de su COP. De este modo, la correcta parametrización de estas tecnologías requiere de la estimación del SPF asociado a cada una de ellas. Puesto que únicamente se conoce el SPF del conjunto de todas las bombas de calor aerotérmicas, se toma como hipótesis de trabajo que la relación entre SPF promedio y el COP promedio para el total de la muestra se mantiene para las tecnologías de COP bajo, medio y alto. De esta forma, a partir del COP estimado anteriormente se puede obtener la evolución del SPF a lo largo del periodo de estudio para cada una de las tecnologías basadas en la aerotermia.

Puesto que para la bomba de calor geotérmica no se ha realizado ningún desglose adicional en varias tecnologías, los datos del IDAE [26], ya proporcionan la evolución del SPF promedio necesaria para la parametrización de esta tecnología. En base a la hipótesis anterior, estos datos permiten obtener la evolución del COP promedio para esta tecnología suponiendo que la

relación entre COP promedio y SPF promedio coincide con la correspondiente a la bomba de calor aerotérmica. De igual modo, los resultados completos se exponen en el apartado 5.3.

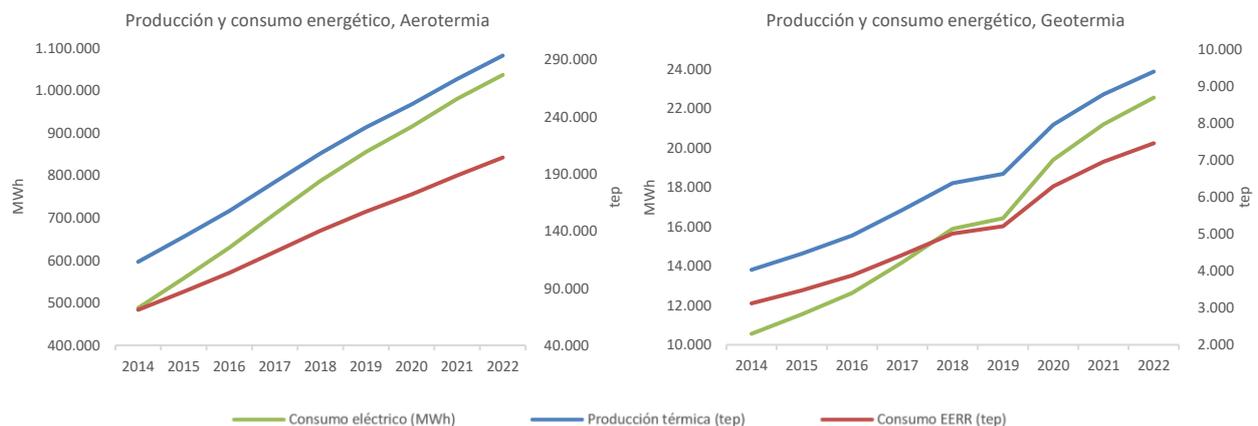
Estas hipótesis permiten obtener una estimación realista del comportamiento tanto de las bombas de calor aerotérmicas como geotérmicas en términos de eficiencia y operación.

5.2.3 PROYECCIÓN DE VARIABLES DE PRODUCCIÓN Y CONSUMO ENERGÉTICO

Según los datos estadísticos anuales recopilados por el IDAE [26] para el periodo 2014-2022, el parque de bombas de calor aerotérmicas en España tuvo un consumo eléctrico anual que pasó de 487.807 MWh en 2014 a 1.036.475 MWh en 2022. La producción térmica aumentó de 112.972 tep en 2014 a 293.318 tep en 2022, mientras que el consumo de energía renovable (EERR) se incrementó de 71.020 tep en 2014 a 204.181 tep en 2022.

En el caso de las bombas de calor geotérmicas, el consumo eléctrico anual fue de 10.556 MWh en 2014 y alcanzó los 22.531 MWh en 2022. La producción térmica de este tipo de bombas aumentó de 4.027 tep en 2014 a 9.387 tep en 2022, y el consumo de energías renovables (EERR) pasó de 3.120 tep en 2014 a 7.449 tep en 2022. Estos datos se muestran en la Figura 9, donde se puede observar el significativo crecimiento en el consumo y producción de ambas tecnologías, reflejando su papel cada vez más relevante en el panorama energético de España.

Figura 9: Evolución de la producción y consumo energético en bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas.



Elaboración propia a partir de [26].

En cuanto a las proyecciones futuras, detalladas en el apartado 5.3, se destaca que para el año 2050 las bombas de calor aerotérmicas alcanzarán una producción térmica de 935.037 tep con

un consumo eléctrico anual de 1.627.575 MWh. En comparación, las bombas de calor geotérmicas proyectan una producción térmica de 28.508 tep y un consumo eléctrico anual de 65.396 MWh para el 2050.

Finalmente, utilizando los datos históricos del IDAE [26] sobre la producción térmica expresada en toneladas equivalentes de petróleo, se calcula el calor generado por el parque de bombas en operación, esta vez expresado en megavatios hora. Para ello, se aplica el factor de conversión de 11,63 tep por cada MWh. Todos los resultados completos se presentan en el apartado 5.3.

5.2.4 PROYECCIÓN DE LAS VARIABLES ECONÓMICAS

Finalmente, en este subapartado se detallará la metodología empleada para proyectar las principales variables económicas clave para la parametrización de las bombas de calor: el CAPEX y el OPEX. Estas variables resultan fundamentales para evaluar los costes asociados a cada tecnología y, además, permiten establecer comparativas entre ellas y otras tecnologías alternativas. De manera adicional se detalla al final de este subapartado la metodología del cálculo del LCOH para la bomba de calor aerotérmica y geotérmica.

I. Capital Expenditure (CAPEX)

Puesto que no se disponen de datos concretos y actualizados para el territorio español, se ha empleado como aproximación datos de países similares. Concretamente, se han utilizado los datos históricos recogidos en el informe “*Decarbonising Home Heating: An Evidence Review of Domestic Heat Pump Installed Costs*” [28] elaborado por el UK Energy Research Centre. En la fecha en la que se elabora el presente trabajo los datos anteriores ofrecen la aproximación más fiable para el propósito de estudio.

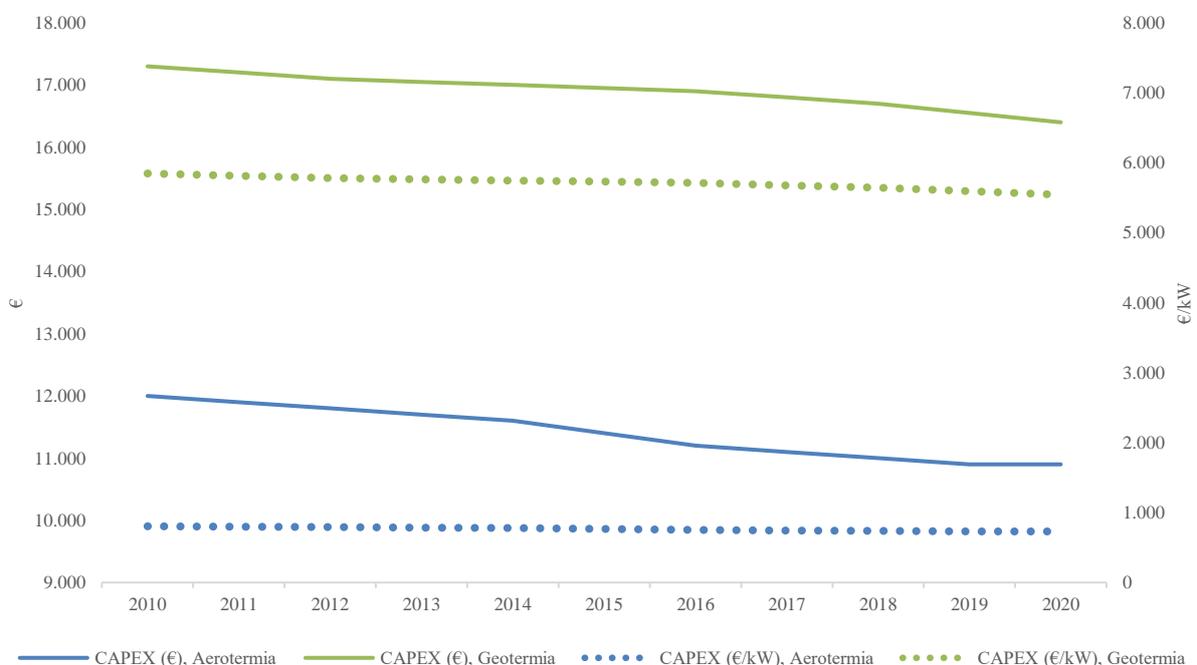
Es importante señalar que los datos de inversión no se han tomado directamente del informe, ya que este no especifica la potencia media utilizada para calcular el coste normalizado en €/kW. Además, el informe no considera el incremento de la capacidad instalada a lo largo del tiempo, lo que limita la posibilidad de emplear los datos en bruto para este estudio.

Estos datos son utilizados para poder conocer la tendencia del precio por unidad de potencia instalada, de forma que se disponga de la evolución para el territorio nacional del CAPEX

expresado en €/kW a lo largo del periodo de estudio tanto para la bomba de calor aerotérmica como geotérmica. Para ello, a partir de los datos de distintos fabricantes se ha estimado un coste actual de inversión medio por unidad de potencia tanto para el caso de la bomba de calor aerotérmica como geotérmica. De este modo se extrapola este valor al resto de años en base a la evolución observada en los datos obtenidos del informe elaborado por el UK Energy Research [28]. Los resultados pueden ser consultados de manera íntegra en el siguiente apartado.

Tal y como se puede observar en la Figura 10, los costes totales de inversión, CAPEX, para las bombas aerotérmicas y geotérmicas muestran una tendencia decreciente. En el caso de las bombas de calor aerotérmicas, el CAPEX ha experimentado un decrecimiento medio anual del 0,96%, al disminuir de 12.000 € en 2010 a 10.900 € en 2020. De igual manera, en términos de coste por capacidad instalada, también ha seguido una tendencia descendente, bajando de aproximadamente 804 €/kW en 2010 a cerca de 731 €/kW en 2020.

Figura 10: Costes totales de instalación por tecnología, hasta 2020 (Reino Unido y resto del mundo).



Elaboración propia a partir de [28].

De manera análoga, el CAPEX de las bombas de calor geotérmicas ha experimentado un decrecimiento medio anual del 0,53%, al disminuir de 17.300 € en 2010 a 16.400 € en 2020.

De igual manera, en términos de coste por capacidad instalada, el CAPEX también presenta una tendencia bajista, pasando de 5.847 €/kW en 2010 a 5.542 €/kW en 2020.

II. Operational Expenditure (OPEX)

Al igual que con el CAPEX, no se dispone de datos concretos y actualizados para el territorio español, por lo que se han empleado como aproximación datos de países similares. Sin embargo, en lo que respecta a los costes operativos asociados al funcionamiento de las bombas de calor por cada kW de energía térmica generada, conocidos como OPEX, el informe sectorial mencionado anteriormente [28], que analiza específicamente los costes de instalación de bombas de calor domésticas, no recoge información sobre esta métrica.

Tras consultar con expertos del sector, se ha decidido aproximar esta variable económica al coste de la electricidad como único coste operativo, dado que el estudio se centra exclusivamente en bombas de calor renovables y se asume que los costes de mantenimiento son nulos. El valor anualizado del OPEX (€/kWh) se ha estimado a partir del valor medio del mercado spot de la electricidad para los años comprendidos entre 2014 y 2020 facilitados por Red Eléctrica de España. Este ha sido empleado en la determinación de los costes operativos tanto para las bombas aerotérmicas como las bombas geotérmicas.

III. Levelized Cost of Heating (LCOH)

Se ha calculado el LCOH para las dos bombas de calor analizadas, con el objetivo de evaluar el coste nivelado de generación de calor a lo largo de su vida útil. No obstante, este cálculo no ha formado parte del proceso de parametrización de las bombas de calor y su posterior implantación en el modelo openMASTER, sino que se ha realizado como un estudio complementario. Este análisis adicional permite obtener una perspectiva más completa de los costes asociados a cada tecnología, facilitando su comparación con tecnologías alternativas y la contextualización de las bombas de calor dentro del marco general de estudio.

El cálculo del LCOH emplea la siguiente fórmula la cual considera tanto los costes totales del sistema, posibles subvenciones otorgadas a la tecnología y la energía entregada durante el período de análisis. Se define el LCOH mediante la siguiente expresión:

$$LCOH = \frac{I_0 - S_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T E_t}$$

Donde:

- $LCOH$ [€/MWh]: coste normalizado de calefacción.
- I_0 [€]: inversión inicial.
- S_0 [€]: subvenciones.
- C_t [€]: costes operativos y de mantenimientos para el periodo t .
- r [%]: tasa de descuento.
- T [años]: vida útil del proyecto.
- E_t [MWh]: energía térmica suministrada por el sistema en el periodo t .

De manera preliminar se establecieron las siguientes hipótesis de trabajo:

- *Vida útil de la tecnología*: se ha considerado un período de funcionamiento de 20 años para la bomba de calor aerotérmica y una vida útil de 25 años para la bomba geotérmica. Se ha elegido una vida útil más extensa para la bomba geotérmica, ya que esta puede alcanzar entre 20 y 25 años, especialmente en lo que concierne al compresor, que es uno de los componentes más críticos del sistema. Adicionalmente, su estructura subterránea, presenta una vida útil todavía más amplia pudiendo alcanzar más de 50 años [33].
- *Tasa de descuento*: se asumió una tasa de descuento del 3,633%, basada en referencias de mercado, específicamente en el promedio anual para el 2024 de la tasa de rendimiento del bono del estado español a 20 años. Se ha elegido para la determinación de la tasa de descuento el bono a 20 años ya que este se ajusta al periodo elegido para representar la vida útil de esta tecnología. Esto asegura la coherencia entre el período de análisis económico y el índice financiero utilizado.
- *Subvenciones otorgadas*: se incluyeron incentivos según las distintas tecnologías de estudio, subvencionando en un 40% la bomba de calor aerotérmica y en un 50% la bomba geotérmica, sobre el coste total de la inversión inicial. Para la selección de los valores porcentuales se han consultado antiguas ayudas concedidas para la implantación de sistemas térmicos renovables en el sector residencial. Más concretamente aquellas

enmarcadas en el programa 6 regulado por el RD 477/2021 [34], del 29 de junio, y financiado con 100 millones de euros, del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia diseñado para la ejecución de los fondos Next Generation EU. Las ayudas de este programa varían entre 40% y el 70% en función de la tecnología utilizada y de la comunidad autónoma [35].

- *CAPEX (€/kW)*: como se comentaba anteriormente se proporciona la inversión en € por kW instalado, concretamente se ha seleccionado un valor promedio de 700 €/kW para la aerotermia y de 5.000 €/kW para la geotermia como dato de referencia para el periodo 2024. En ambas tecnologías el precio varía en función de su capacidad y fabricante, no obstante, tras haber consultado distintas fuentes se observa que el rango de precio para la aerotermia oscila entre 670 y 1.400 €/kW [36] y el rango de precio para la geotermia entre 2.000 y 6.000 €/kW [37]. Ambos rangos no incluyen otros conceptos como el precio de la mano de obra, el transporte del equipo, el termostato, tuberías, entre otros elementos relacionados con la instalación, por lo que finalmente se ha considerado redondear ambos valores de CAPEX a las cifras de 700 €/kW y 5.000 €/kW.

El cálculo de los costes totales se desglosó en tres componentes principales: el CAPEX, que incluye el coste por unidad de potencia instalada en €/kW multiplicado por la potencia media requerida; los gastos anuales de operación y mantenimiento, expresados a través del OPEX, en €/kWh entregado y multiplicados por el consumo eléctrico anual para cada instalación según el periodo de estudio; y las subvenciones otorgadas las cuales disminuyen el coste de inversión en un 40% y 50% para las bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas respectivamente.

Cabe destacar que el coste de operación y mantenimiento se ajusta mediante un factor de descuento según la tasa de descuento anteriormente descrita y el periodo en el que se devenguen los costes, reflejando así el valor temporal del dinero.

Por otro lado, para el cálculo de la energía entregada, esta se estima en función del número de plantas y la producción térmica total para cada periodo, la producción térmica unitaria por planta tanto para la bomba de calor aerotérmica como geotérmica.

Finalmente, el LCOH se calcula sumando los costes anuales descontados a valor presente y dividiéndolos entre sumatorio de toda la energía entregada a lo largo de la vida útil de la tecnología.

Los resultados completos de este análisis se pueden consultar en la Tabla 5 para la bomba de calor aerotérmica, y la Tabla 6 para la bomba de calor geotérmica. Adicionalmente, se incluye el detalle completo del cálculo del LCOH para ambas tecnologías en el año 2025, tal y como se recoge en las Tablas 7 y 8. Por último, en la Figura 11 se puede observar gráficamente la evolución temporal del LCOH expresado en €/MWh para la aerotermia y la geotermia.

Tabla 5: Resultados del LCOH para la bomba de calor aerotérmica.

Costes totales	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
CAPEX (€/kW)	731	693	659	627	597	567	540	513	488	465	442	420
Potencia térmica media (kWt)	4,54	5,28	5,96	6,59	7,19	7,76	8,30	8,81	9,31	9,78	10,24	10,68
CAPEX (€)	3.320	3.661	3.927	4.134	4.290	4.402	4.479	4.524	4.545	4.544	4.525	4.491
Subvenciones (€)	1.328	1.465	1.571	1.654	1.716	1.761	1.791	1.810	1.818	1.818	1.810	1.796
OPEX (€/kWh)	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Consumo eléctrico (MWh)	914.746	1.203.418	1.423.279	1.575.626	1.660.457	1.677.774	1.627.575	1.509.862	1.324.633	1.071.890	751.631	363.858
Número de plantas	3.517.775	4.381.545	5.089.468	5.686.187	6.209.631	6.680.267	7.110.598	7.508.904	7.881.002	8.231.155	8.562.598	8.877.850
O&M (€)	8,83	13,46	14,12	14,41	14,31	13,81	12,93	11,66	10,00	7,94	5,49	2,62
Factor de descuento (%)	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%
Valor presente costes O&M (€)	8,52	12,99	13,63	13,90	13,80	13,33	12,48	11,25	9,65	7,67	5,29	2,53
NPV (€)	2.232	2.395	2.555	2.674	2.757	2.808	2.832	2.833	2.816	2.790	2.760	2.732

Energía entregada	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
Número de plantas	3.517.775	4.381.545	5.089.468	5.686.187	6.209.631	6.680.267	7.110.598	7.508.904	7.881.002	8.231.155	8.562.598	8.877.850
Producción térmica (MWh)	2.915.374	4.239.565	5.566.548	6.893.531	8.220.514	9.547.497	10.874.480	12.201.463	13.528.446	14.855.429	16.182.412	17.509.395
Producción térmica unitaria (MWh)	0,83	0,97	1,09	1,21	1,32	1,43	1,53	1,62	1,72	1,80	1,89	1,97
Energía entregada total (MWh)	21,44	23,92	26,18	28,31	30,33	32,26	34,10	35,88	37,43	38,53	39,20	39,45

LCOH Aerotermia	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
LCOH (€/MWh)	104,13	100,12	97,60	94,46	90,90	87,06	83,05	78,95	75,22	72,40	70,41	69,25

Elaboración propia.

Tabla 6: Resultados del LCOH para la bomba de calor geotérmica.

Costes totales	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
CAPEX (€/kW)	5.542	4.958	4.747	4.535	4.324	4.113	3.902	3.690	3.479	3.268	3.057	2.846
Potencia térmica media (kWt)	22,98	23,63	24,36	24,84	25,17	25,42	25,61	25,75	25,88	25,98	26,06	26,13
CAPEX (€)	127.354	117.142	115.643	112.652	108.843	104.535	99.903	95.047	90.030	84.893	79.665	74.366
Subvenciones	63.677	58.571	57.821	56.326	54.421	52.268	49.952	47.523	45.015	42.447	39.833	37.183
OPEX (€/kWh)	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Consumo eléctrico (MWh)	19.382	26.831	34.544	42.257	49.970	57.683	65.396	73.109	80.822	88.535	96.248	103.961
Número de plantas	2.924	4.075	5.191	6.308	7.424	8.540	15.237	15.237	15.237	15.237	15.237	15.237
O&M (€)	225	323	336	348	360	372	242	278	316	354	395	437
Factor de descuento	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%	96,49%
Valor presente costes O&M (€)	217,21	311,30	324,25	336,16	347,49	358,48	234,00	268,54	304,55	342,02	380,96	421,37
NPV (€)	70.398	64.228	63.672	62.364	60.641	58.667	55.125	53.292	51.299	49.143	46.811	44.277

Energía entregada	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
Número de plantas	2.924	4.075	5.191	6.308	7.424	8.540	9.656	10.772	11.888	13.004	14.121	15.237
Producción térmica (MWh)	92.480	131.274	171.327	211.381	251.435	291.489	331.811	331.811	331.811	331.811	331.811	331.811
Producción térmica unitaria (MWh)	31,63	32,21	33,00	33,51	33,87	34,13	34,90	34,90	34,90	34,90	34,90	34,90
Energía entregada total (MWh)	826,13	838,22	847,44	854,08	859,11	863,07	872,58	872,58	872,58	872,58	872,58	872,58

LCOH Geotermia	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
LCOH (€/MWh)	85,21	76,62	75,14	73,02	70,59	67,97	63,17	61,07	58,79	56,32	53,65	50,74

Elaboración propia.

En la Figura 11 se observa que, a lo largo del período 2020-2075, ambos LCOH presentan una tendencia decreciente. Sin embargo, la geotermia mantiene consistentemente un LCOH inferior al de la aerotermia. Siendo en el año 2020, considerable la diferencia inicial, y aunque ambos sistemas experimentan una disminución en sus respectivos valores del LCOH, la brecha relativa entre ellos se mantiene hasta 2075, reflejando una mayor competitividad económica de la geotermia.

La reducción del LCOH con el tiempo puede atribuirse a diversas razones, entre ellas las mejoras tecnológicas que aumentan la eficiencia de las bombas de calor y reducen los costes operativos, como el suministro de la electricidad. También es importante considerar los beneficios de las economías de escala, la reducción de costes en la cadena de suministro y un incremento en la experiencia operativa como factores que contribuyen a esta disminución.

Finalmente, hay que destacar que el LCOH de la geotermia es inferior con respecto al de la bomba aerotérmica, de manera constante. Esto es consecuencia de su mayor eficiencia energética, ya que la extracción de calor es constante al ser el suelo una fuente estable de calor. Esto minimiza las pérdidas y garantiza una operación más estable para esta tecnología. Asimismo, la aerotermia está más expuesta a fluctuaciones en las condiciones climáticas, lo que reduce su eficiencia en períodos de temperaturas extremas, mientras que la geotermia opera más uniformemente. Además, aunque la inversión inicial de la instalación suele ser más alta en

comparación con la aerotermia, los menores costes operativos y de mantenimiento de la geotermia compensan esta inversión inicial. Finalmente, la mayor vida útil de los sistemas geotérmicos permite amortizar los costes iniciales de inversión en un período más largo, lo que contribuye a reducir el LCOH en comparación con la aerotermia.

Tabla 7: Detalle del cálculo del LCOH para la bomba de calor aerotérmica para el año 2025.

Costes totales	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
CAPEX (€/kW)	693	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Potencia térmica media (kWt)	5,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CAPEX (€)	3.661	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Subvenciones (€)	1.465	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OPEX (€/kWh)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Consumo eléctrico (MWh)	1.203.418	1.252.791	1.299.464	1.343.437	1.384.708	1.423.279	1.459.150	1.492.320	1.522.789	1.550.558
Número de plantas	4.381.545	4.534.976	4.681.817	4.822.793	4.958.507	5.089.468	5.216.108	5.338.797	5.457.858	5.573.572
O&M (€)	13,46	13,62	13,77	13,90	14,02	14,12	14,21	14,28	14,34	14,38
Factor de descuento (%)	96,49%	93,11%	89,85%	86,70%	83,66%	80,73%	77,90%	75,16%	72,53%	69,99%
Valor presente costes O&M (€)	12,99	12,68	12,37	12,05	11,73	11,40	11,07	10,74	10,40	10,07
NPV (€)	2.395	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Energía entregada	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Número de plantas	4.381.545	4.534.976	4.681.817	4.822.793	4.958.507	5.089.468	5.216.108	5.338.797	5.457.858	5.573.572
Producción térmica (MWh)	4.239.565	4.504.962	4.770.359	5.035.755	5.301.152	5.566.548	5.831.945	6.097.342	6.362.738	6.628.135
Producción térmica unitaria (MWh)	0,97	0,99	1,02	1,04	1,07	1,09	1,12	1,14	1,17	1,19
Energía entregada total (MWh)	23,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-

LCOH Aerotermia	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
LCOH (€/MWh)	100,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Costes totales	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
CAPEX (€/kW)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Potencia térmica media (kWt)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CAPEX (€)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Subvenciones (€)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OPEX (€/kWh)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Consumo eléctrico (MWh)	1.575.626	1.597.993	1.617.660	1.634.627	1.648.892	1.660.457	1.669.322	1.675.486	1.678.949	1.679.712
Número de plantas	5.686.187	5.795.919	5.902.965	6.007.497	6.109.672	6.209.631	6.307.501	6.403.398	6.497.428	6.589.688
O&M (€)	14,41	14,42	14,41	14,39	14,36	14,31	14,24	14,16	14,06	13,94
Factor de descuento (%)	67,53%	65,17%	62,88%	60,68%	58,55%	56,50%	54,52%	52,61%	50,76%	48,98%
Valor presente costes O&M (€)	9,73	9,40	9,06	8,73	8,41	8,08	7,76	7,45	7,14	6,83
NPV (€)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Energía entregada	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
Número de plantas	5.686.187	5.795.919	5.902.965	6.007.497	6.109.672	6.209.631	6.307.501	6.403.398	6.497.428	6.589.688
Producción térmica (MWh)	6.893.531	7.158.928	7.424.325	7.689.721	7.955.118	8.220.514	8.485.911	8.751.308	9.016.704	9.282.101
Producción térmica unitaria (MWh)	1,21	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,35	1,37	1,39	1,41
Energía entregada total (MWh)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

LCOH Aerotermia	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
LCOH (€/MWh)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaboración propia.

Tabla 8: Detalle del cálculo del LCOH para la bomba de calor geotérmica para el año 2025.

Costes totales	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
CAPEX (€/kW)	4.958	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Potencia térmica media (kWt)	23,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CAPEX (€)	117.142	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Subvenciones	58.571	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OPEX (€/kWh)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Consumo eléctrico (MWh)	26.831	28.374	29.916	31.459	33.001	34.544	36.087	37.629	39.172	40.714	42.257	43.800
Número de plantas	4.075	4.298	4.522	4.745	4.968	5.191	5.415	5.638	5.861	6.084	6.308	6.531
O&M (€)	323	325	328	331	333	336	339	341	344	346	348	351
Factor de descuento	96,49%	93,11%	89,85%	86,70%	83,66%	80,73%	77,90%	75,16%	72,53%	69,99%	67,53%	65,17%
Valor presente costes O&M (€)	311,30	303,00	294,84	286,83	278,96	271,26	263,73	256,36	249,16	242,13	235,27	228,58
NPV (€)	64.228	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Energía entregada	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Número de plantas	4.075	4.298	4.522	4.745	4.968	5.191	5.415	5.638	5.861	6.084	6.308	6.531
Producción térmica (MWh)	131.274	139.284	147.295	155.306	163.317	171.327	179.338	187.349	195.360	203.370	211.381	219.392
Producción térmica unitaria (MWh)	32,212	32,403	32,575	32,731	32,873	33,002	33,121	33,230	33,332	33,425	33,512	33,593
Energía entregada total (MWh)	838,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

LCOH Geotermia	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
LCOH (€/MWh)	76,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

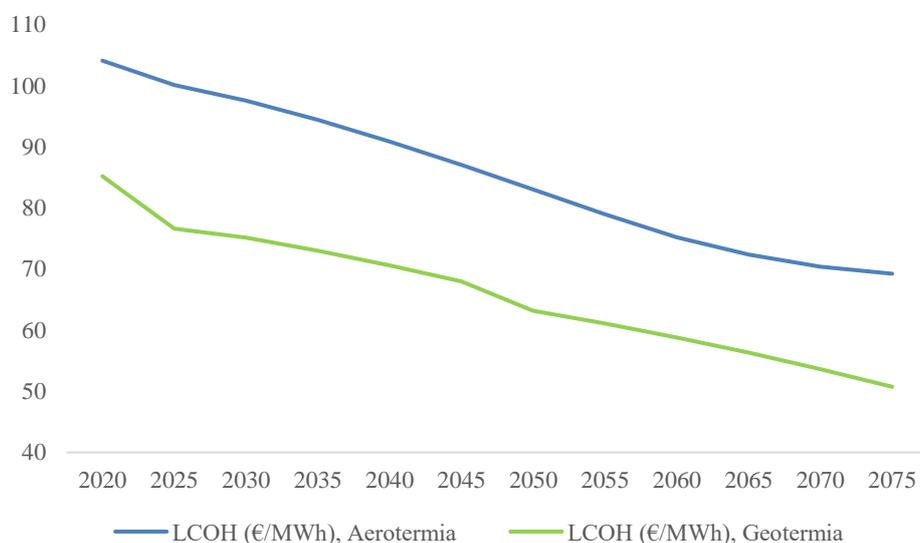
Costes totales	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
CAPEX (€/kW)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Potencia térmica media (kWt)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CAPEX (€)	-												
Subvenciones	-												
OPEX (€/kWh)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Consumo eléctrico (MWh)	45.342	46.885	48.427	49.970	51.513	53.055	54.598	56.140	57.683	59.226	60.768	62.311	63.853
Número de plantas	6.754	6.977	7.200	7.424	7.647	7.870	8.093	8.317	8.540	8.763	8.986	9.210	9.433
O&M (€)	353	355	358	360	362	365	367	369	372	374	376	378	380
Factor de descuento	62,88%	60,68%	58,55%	56,50%	54,52%	52,61%	50,76%	48,98%	47,27%	45,61%	44,01%	42,47%	40,98%
Valor presente costes O&M (€)	222,05	215,69	209,49	203,46	197,58	191,86	186,29	180,86	175,59	170,46	165,47	160,61	155,89
NPV (€)	-												

Energía entregada	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
Número de plantas	6.754	6.977	7.200	7.424	7.647	7.870	8.093	8.317	8.540	8.763	8.986	9.210	9.433
Producción térmica (MWh)	227.403	235.413	243.424	251.435	259.446	267.456	275.467	283.478	291.489	299.499	307.510	315.521	323.531
Producción térmica unitaria (MWh)	33,669	33,740	33,807	33,869	33,928	33,984	34,036	34,086	34,133	34,177	34,220	34,260	34,299
Energía entregada total (MWh)	-												

LCOH Geotermia	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
LCOH (€/MWh)	-												

Elaboración propia.

Figura 11: Evolución temporal del LCOH para la bomba de calor.



Elaboración propia.

5.2.5 PROYECCIÓN DE CAPACIDAD MÁXIMA SEGÚN LA TECNOLOGÍA

Las proyecciones vistas en subapartados anteriores muestran tendencias muy optimistas que tal vez no reflejen las restricciones reales a las que se enfrenta esta tecnología. Aunque es realista pensar que los avances tecnológicos continúen reduciendo costes, así como aumentando la eficiencia, existen limitaciones prácticas, como la disponibilidad de recursos, posibles barreras de financiación, la evolución del número de hogares y las viviendas de nueva construcción, entre otras que condicionan y limitan la expansión de esta tecnología. Por lo tanto, resulta fundamental considerar estos factores para realizar una estimación más precisa y realista del potencial máximo de cada tecnología en el futuro.

I. Límite de capacidad para la bomba de calor aerotérmica

Para estimar el límite superior de la capacidad máxima que podría instalarse a nivel nacional, se han utilizado tanto datos históricos como las proyecciones de hogares generadas por el modelo openMASTER, basado en datos estadísticos proporcionados por el INE. Este límite se fundamenta en la idea de que el número de bombas de calor instaladas estará directamente relacionado con el número de hogares proyectados, asumiendo que cada hogar contará, como máximo, con una sola bomba de calor. Esta aproximación busca reflejar una estimación más realista, basada en tendencias demográficas.

Una vez recopilados los datos históricos y las proyecciones del número de hogares en España, y asumiendo que las bombas de calor aerotérmicas tienen, en promedio, una vida útil de 20 años, esto supone que una vigésima parte de los hogares reemplazaría o adquiriría una bomba de calor aerotérmica cada año suponiendo una distribución uniforme de la adquisición y reemplazo de estas bombas. A partir de esta estimación, se establece como potencia máxima teórica 10 kW para el año 2020, y se toma la hipótesis de que esta crece de manera lineal hasta alcanzar los 30 kW en 2050. Gracias a esta asunción se obtuvo la potencia máxima teórica para cada periodo.

A partir de estos datos y utilizando la distribución histórica y las proyecciones del parque de bombas de calor en España, desglosadas por COP y año de instalación, según la Tabla 4, se realiza la implementación en el modelo openMASTER comentada en detalle en el siguiente apartado. Este análisis permite clasificar la capacidad total instalada en las categorías de bombas de calor aerotérmicas con COP bajo, medio, alto y promedio, consiguiendo una representación más exhaustiva en el modelo. Se pueden consultar los límites obtenidos en la Tabla 9.

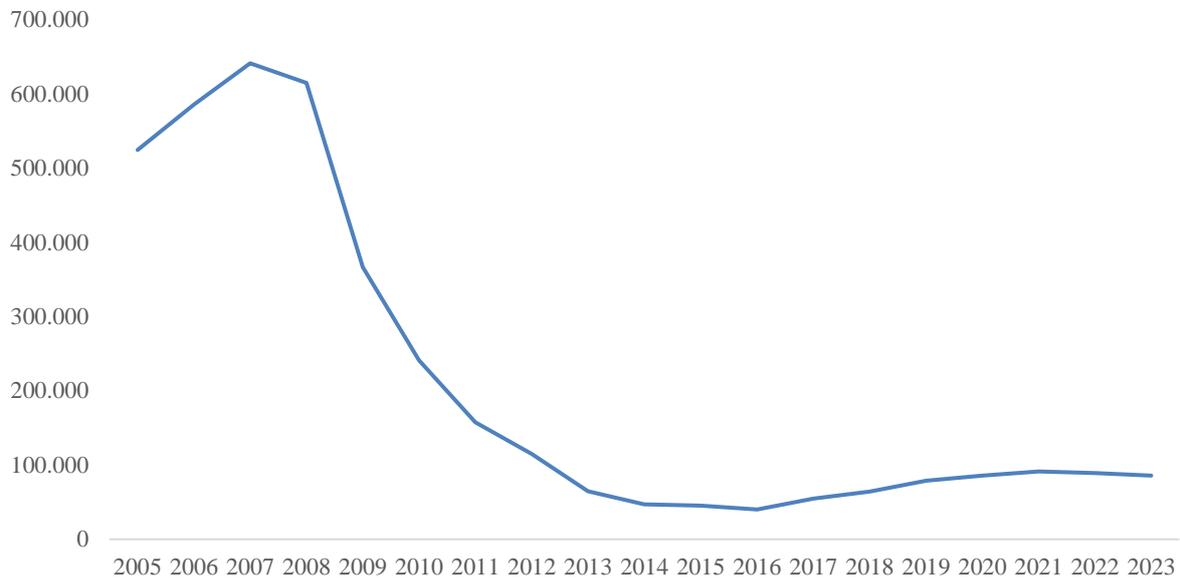
II. Límite de capacidad para la bomba de calor geotérmica

Para establecer el límite de capacidad máxima para la tecnología de la bomba de calor geotérmica, se han tenido en cuenta los certificados de fin de obra expedidos por los colegios de aparejadores, como estimadores de las nuevas viviendas construidas en España. En la Figura 12 se pueden observar los datos históricos obtenidos a partir del boletín estadístico del segundo trimestre del 2024 elaborado por la Asociación Hipotecaria Española [38].

En este análisis, se han tomado exclusivamente los datos correspondientes al periodo 2015-2023, ya que este intervalo refleja con mayor precisión las tendencias recientes de construcción en España, evitando distorsiones provocadas por periodos anteriores con dinámicas económicas significativamente diferentes como ocurrió en el 2008 con la crisis de la burbuja inmobiliaria.

El cálculo de la potencia máxima teórica se entiende como el número total de viviendas nuevas por la capacidad máxima nominal que se podría instalar en cada periodo. Se establece como máxima 30 kW para el año 2020, y se toma la hipótesis de que esta crece de manera lineal hasta alcanzar los 50 kW en 2050.

Figura 12: Evolución de los certificados fin de obra expedidos por los colegios de aparejadores.



Elaboración propia a partir de [38].

Este enfoque permite obtener una estimación más realista y ajustada al desarrollo del potencial de las bombas de calor geotérmicas. Los límites calculados se recogen en la Tabla 10.

5.3 PARAMETRIZACIÓN OBTENIDA PARA LA BOMBA DE CALOR

En base a las proyecciones y estimaciones comentadas en el apartado anterior, en este apartado se presentan la nueva parametrización para las bombas de calor, diferenciando entre la bomba de calor aerotérmica y geotérmica. Esta parametrización será clave en el modelado de ambas tecnologías dentro del modelo openMASTER, respondiendo así al objetivo principal de este análisis.

Es importante resaltar que las proyecciones obtenidas, especialmente aquellas a largo plazo como las correspondientes al año 2075, conllevan una incertidumbre inherente al método de proyección empleado.

Tabla 9: Resultados de la parametrización y cálculo del LCOH para la bomba de calor aerotérmica.

Bomba de calor aerotérmica Aire-aire (reversible)		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
I Variables de capacidad e infraestructura	Número de plantas	409.860	1.942.510	3.517.775	4.381.545	5.089.468	5.686.187	6.209.631
	COP Bajo	1.754	-	-	-	-	-	-
	COP Medio	378.139	1.521.057	1.842.241	-	-	-	-
	COP Alto	29.968	421.453	1.675.534	4.381.545	5.089.468	5.686.187	6.209.631
	Potencia térmica (kWt)	1.636.557	8.718.203	15.986.296	23.148.447	30.319.077	37.489.707	44.660.337
	COP Bajo	44.931	-	-	-	-	-	-
	COP Medio	1.510.202	7.363.470	6.865.063	-	-	-	-
COP Alto	81.424	1.354.733	9.121.233	23.148.447	30.319.077	37.489.707	44.660.337	
Potencia térmica media (kWt)		3,99	4,49	4,54	5,28	5,96	6,59	7,19
II Variables de eficiencia y rendimiento	Horas	179	180	182	183	184	184	185
	COP Promedio	3,99	4,67	5,14	5,69	5,75	5,82	5,88
	COP Bajo	2,49	-	-	-	-	-	-
	COP Medio	3,95	4,50	4,50	-	-	-	-
	COP Alto	5,53	5,57	5,63	5,69	5,75	5,82	5,88
	SPF Promedio	2,45	2,82	3,18	3,55	3,91	4,27	4,64
	SPF Bajo	1,53	-	-	-	-	-	-
SPF Medio	2,43	2,72	2,78	-	-	-	-	
SPF Alto	3,40	3,37	3,48	3,55	3,91	4,27	4,64	
III Variables de producción y consumo energético	Producción térmica (tep)	22.237	134.829	250.677	364.537	478.637	592.737	706.837
	Producción térmica (MWh)	258.616	1.568.058	2.915.374	4.239.565	5.566.548	6.893.531	8.220.514
	Consumo eléctrico (MWh)	138.743	557.940	914.746	1.203.418	1.423.279	1.575.626	1.660.457
	Consumo EERR (tep)	3.647	86.846	172.009	256.127	340.287	424.447	508.607
IV Variables económicas	CAPEX (€)	12.000	11.400	10.900	10.341	9.836	9.357	8.900
	CAPEX (€/kW)	804	764	731	693	659	627	597
	OPEX (€/kWh)	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05
	LCOH (€/MWh)			104,13	100,12	97,60	94,46	90,90
V Variables de capacidad máxima	Número de hogares (Millones)	16,47	17,50	18,54	19,58	20,61	21,65	22,68
	Capacidad máxima (GW)	2,74	5,83	9,27	13,05	17,18	21,65	26,46
	COP Bajo	0,08	-	-	-	-	-	-
	COP Medio	2,53	4,93	3,98	-	-	-	-
COP Alto	0,14	0,91	5,29	13,05	17,18	21,65	26,46	

Bomba de calor aerotérmica Aire-aire (reversible)		2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
I Variables de capacidad e infraestructura	Número de plantas	6.680.267	7.110.598	7.508.904	7.881.002	8.231.155	8.562.598	8.877.850
	COP Bajo	-	-	-	-	-	-	-
	COP Medio	-	-	-	-	-	-	-
	COP Alto	6.680.267	7.110.598	7.508.904	7.881.002	8.231.155	8.562.598	8.877.850
	Potencia térmica (kWt)	51.830.967	59.001.597	66.172.227	73.342.857	80.513.487	87.684.117	94.854.747
	COP Bajo	-	-	-	-	-	-	-
	COP Medio	-	-	-	-	-	-	-
COP Alto	51.830.967	59.001.597	66.172.227	73.342.857	80.513.487	87.684.117	94.854.747	
Potencia térmica media (kWt)		7,76	8,30	8,81	9,31	9,78	10,24	10,68
II Variables de eficiencia y rendimiento	Horas	185	185	186	186	186	186	186
	COP Promedio	5,93	5,99	6,03	6,08	6,11	6,15	6,15
	COP Bajo	-	-	-	-	-	-	-
	COP Medio	-	-	-	-	-	-	-
	COP Alto	5,93	5,99	6,03	6,08	6,11	6,15	6,15
	SPF Promedio	5,00	5,36	5,73	6,09	6,45	6,82	7,18
	SPF Bajo	-	-	-	-	-	-	-
SPF Medio	-	-	-	-	-	-	-	
SPF Alto	5,00	5,36	5,73	6,09	6,45	6,82	7,18	
III Variables de producción y consumo energético	Producción térmica (tep)	820.937	935.037	1.049.137	1.163.237	1.277.337	1.391.437	1.505.537
	Producción térmica (MWh)	9.547.497	10.874.480	12.201.463	13.528.446	14.855.429	16.182.412	17.509.395
	Consumo eléctrico (MWh)	1.677.774	1.627.575	1.509.862	1.324.633	1.071.890	751.631	363.858
	Consumo EERR (tep)	592.767	676.927	761.087	845.247	929.407	1.013.567	1.097.727
IV Variables económicas	CAPEX (€)	8.466	8.053	7.661	7.287	6.932	6.593	6.272
	CAPEX (€/kW)	567	540	513	488	465	442	420
	OPEX (€/kWh)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	LCOH (€/MWh)	87,06	83,05	78,95	75,22	72,40	70,41	69,25
V Variables de capacidad máxima	Número de hogares (Millones)	23,72	24,75	25,79	26,82	27,86	28,90	29,93
	Capacidad máxima (GW)	31,62	37,13	42,98	49,18	55,72	62,61	69,84
	COP Bajo	-	-	-	-	-	-	-
	COP Medio	-	-	-	-	-	-	-
COP Alto	31,62	37,13	42,98	49,18	55,72	62,61	69,84	

Elaboración propia.

Tabla 10: Resultados de la parametrización y cálculo del LCOH para la bomba de calor geotérmica.

Bomba de calor geotérmica Tierra-agua		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
I Variables de capacidad e infraestructura	Número de plantas	727	1.836	2.924	4.075	5.191	6.308	7.424
	Potencia térmica (kWt)	5.717	35.760	67.188	96.290	126.481	156.672	186.863
	Potencia térmica media (kWt)	7,87	19,48	22,98	23,63	24,36	24,84	25,17
II Variables de eficiencia y rendimiento	Horas	1.342	1.450	1.376	1.421	1.448	1.474	1.501
	COP Promedio	5,71	6,67	7,35	8,13	8,22	8,31	8,40
	SPF Promedio	4,25	4,49	4,77	5,01	5,27	5,53	5,78
III Variables de producción y consumo energético	Producción térmica (tep)	956	4.460	7.952	11.288	14.732	18.176	21.620
	Producción térmica (MWh)	11.112	51.872	92.480	131.274	171.327	211.381	251.435
	Consumo eléctrico (MWh)	3.692	11.539	19.382	26.831	34.544	42.257	49.970
	Consumo EERR (tep)	638	3.468	6.285	8.980	11.761	14.541	17.322
IV Variables económicas	CAPEX (€)	17.300	16.950	16.400	14.670	14.045	13.420	12.795
	CAPEX (€/kW)	5.847	5.728	5.542	4.958	4.747	4.535	4.324
	OPEX (€/kWh)	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05
	LCOH (€/MWh)	38,74	77,73	85,21	76,62	75,14	73,02	70,59
V Variables de capacidad máxima	Viviendas completadas	240.920	45.152	85.945	89.992	99.110	105.727	110.925
	Capacidad máxima (GW)	5,62	1,20	2,58	3,00	3,63	4,23	4,81

Bomba de calor geotérmica Tierra-agua		2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
I Variables de capacidad e infraestructura	Número de plantas	8.540	9.656	10.772	11.888	13.004	14.121	15.237
	Potencia térmica (kWt)	217.054	247.245	277.436	307.627	337.818	368.009	398.200
	Potencia térmica media (kWt)	25,42	25,61	25,75	25,88	25,98	26,06	26,13
II Variables de eficiencia y rendimiento	Horas	1.527	1.554	1.580	1.607	1.633	1.660	1.686
	COP Promedio	8,48	8,56	8,62	8,69	8,74	8,79	8,79
	SPF Promedio	6,04	6,29	6,55	6,80	7,06	7,31	7,57
III Variables de producción y consumo energético	Producción térmica (tep)	25.064	28.508	31.952	35.396	38.840	42.284	45.728
	Producción térmica (MWh)	291.489	331.542	371.596	411.650	451.703	491.757	531.811
	Consumo eléctrico (MWh)	57.683	65.396	73.109	80.822	88.535	96.248	103.961
	Consumo EERR (tep)	20.103	22.884	25.664	28.445	31.226	34.006	36.787
IV Variables económicas	CAPEX (€)	12.170	11.545	10.920	10.295	9.670	9.045	8.420
	CAPEX (€/kW)	4.113	3.902	3.690	3.479	3.268	3.057	2.846
	OPEX (€/kWh)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	LCOH (€/MWh)	67,97	63,17	61,07	58,79	56,32	53,65	50,74
V Variables de capacidad máxima	Viviendas completadas	115.205	118.844	122.009	124.809	127.320	129.596	131.677
	Capacidad máxima (GW)	5,38	5,94	6,51	7,07	7,64	8,21	8,78

Elaboración propia.

Las bombas de calor se presentan como una tecnología clave para el futuro de la transición energética. Esta tecnología es capaz de proporcionar calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria de manera eficiente y sostenible.

Los datos de las Tablas 9 y 10 reflejan un crecimiento significativo en el número de instalaciones, lo que evidencia su creciente adopción. En el caso de las bombas aerotérmicas, el número de plantas pasa de 4.381.545 en 2025 a 7.110.598 en 2050, mientras que las bombas geotérmicas experimentan un incremento de 4.075 a 9.656 durante ese mismo período. Este crecimiento sostenido es indicativo de la aceptación de esta tecnología como una alternativa viable en el sector residencial frente a los sistemas de climatización tradicionales.

Otra métrica significativa es el aumento en la capacidad instalada reforzando aún más su potencial. Para las bombas aerotérmicas, la potencia térmica total se incrementa de 23.148.447 kWt en 2025 a 59.001.597 kWt en 2050, mientras que la potencia térmica media crece de 5,28 kWt a 8,30 kWt para el mismo período. Por su parte, las bombas geotérmicas muestran un comportamiento similar, al aumentar su capacidad instalada de 96.290 kWt a 247.245 kWt, y con una potencia térmica media que asciende de 23,63 kWt a 25,61 kWt. Estos datos reflejan mejoras tecnológicas significativas y una capacidad creciente para satisfacer la demanda energética de manera eficiente y sostenible.

En términos de eficiencia, las bombas de calor experimentan mejoras sustanciales a lo largo del periodo de estudio. En el caso de las bombas aerotérmicas, su COP promedio sube de 5,69 en 2025 a 5,99 en 2050, mientras que su SPF promedio aumenta de 3,55 a 5,36. Por otro lado, las bombas geotérmicas, son aún más eficientes, con un COP promedio que crece de 8,13 a 8,56 y un SPF promedio que pasa de 5,01 a 6,29 en ese mismo período.

La producción térmica también muestra un crecimiento destacado, demostrando la capacidad de las bombas de calor para satisfacer necesidades energéticas cada vez mayores. Las bombas aerotérmicas aumentan su producción de 4.239.565 MWh en 2025 a 10.874.480 MWh en 2050, mientras que las bombas geotérmicas pasan de 11.288 tep a 28.508 tep durante el mismo período. Este incremento en la producción energética posiciona a las bombas de calor como una solución clave en el marco de la electrificación y la transición hacia un sistema energético más sostenible.

Los costes asociados a estas tecnologías disminuyen significativamente, lo que mejora su competitividad económica. En el caso de las bombas aerotérmicas, su LCOH cae drásticamente de 100,12 €/MWh en 2025 a 83,05 €/MWh en 2050, mientras que, para las bombas geotérmicas, el LCOH disminuye de 76,62 €/MWh a 63,17 €/MWh. Además, la inversión inicial también muestra una reducción constante y significativa, lo cual se traduce en una mayor facilidad a la hora de adoptar estas tecnologías por parte de los usuarios finales del sector residencial.

En cuanto al estudio teórico de la capacidad máxima de ambas tecnologías, también esta variable se incrementa de manera notable, lo cual evidencia su capacidad para abastecer a una mayor cantidad de hogares. En el caso de las bombas aerotérmicas, su capacidad máxima

proyectada crece de 13,05 GW en 2025 hasta 37,13 GW en 2050, mientras que, para las bombas geotérmicas, la capacidad máxima aumenta de 3 GW a 5,94 GW. Se evidencia en el caso de la bomba de calor geotérmica las limitaciones físicas inherentes a esta tecnología, dificultando su despliegue a nivel nacional.

Finalmente, se puede concluir que las bombas de calor presentan una perspectiva prometedora en lo que concierne la futura descarbonización del sector residencial. Al ser altamente eficientes y compatibles con fuentes de energía renovable, estas tecnologías contribuyen de manera significativa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la transición hacia un modelo energético más limpio. En este sentido, se posicionan no solo como una solución viable en el presente, sino como un elemento esencial para garantizar un futuro energético sostenible.

5.4 IMPLEMENTACIÓN EN EL MODELO OPENMASTER

En este apartado se detalla la implementación de la nueva parametrización en la herramienta openMASTER. Como se introducía en el capítulo del estado del arte, aunque este modelo se presenta como una herramienta en la planificación energética a largo plazo, la parametrización de la bomba de calor no se encuentra suficientemente desarrollada. De esta forma, se busca incorporar todas las proyecciones y cálculos anteriores a esta herramienta y analizar los resultados obtenidos, especialmente en la tecnología de la bomba de calor y con foco en la reducción de emisiones, inversión necesaria y la pobreza energética.

5.4.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL MODELO

Tal y como se comentaba en anteriores capítulos, este trabajo fin de máster emplea el modelo openMASTER, desarrollado por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas, como herramienta fundamental para analizar la senda de descarbonización en España, con un enfoque particular en el impacto de las bombas de calor sobre las familias más vulnerables. Dicho modelo se basa en Pyomo, una plataforma de modelado de optimización en Python.

OpenMASTER es un modelo de equilibrio parcial dinámico y programación lineal diseñado para la planificación energética a largo plazo. Este permite la evaluación exhaustiva de distintas tecnologías, como las bombas de calor, identificando las decisiones de inversión y operación para su despliegue masivo en el sistema energético español. Esto facilita proyectar cuantitativamente su impacto en la transición energética del país con un horizonte temporal hasta 2050.

El modelo se encuentra organizado en torno a diversos procesos y flujos que abarcan toda la cadena de valor del sector energético, desde la energía primaria hasta su uso final. Es por esto que este trabajo se centrará especialmente en los bloques finales Supply Technologies (*ST*) y Energy Services (*ES*), los más relevantes para las bombas de calor. [25]

Dentro del modelo openMASTER, la parametrización anterior de las bombas de calor incluye dos tecnologías: Heat Pump COP 3 y Heat Pump COP 6, diferenciadas por su coeficiente de rendimiento, como su nombre indica. Se consideran tres usos finales para estas tecnologías: calefacción residencial, refrigeración y agua caliente sanitaria, lo que da lugar a seis combinaciones dentro del bloque de Servicios Energéticos. Para cada combinación, el modelo especifica eficiencias energéticas en GWh por unidad de servicio energético y asume emisiones de CO₂, NO_x y SO_x nulas, al utilizar energía 100% renovable.

La capacidad instalada inicial, constante entre 2005 y 2020, se define en 24,4 y 6,1 unidades ST para las bombas COP 3 y COP 6, respectivamente. Los costes de capital (CAPEX) en 2020 se estiman en 1.377 y 2.066 millones de euros por unidad ST para cada tecnología, con una proyección de reducción hasta 800 y 1.200 millones para 2050. En cuanto a la eficiencia energética, esta comienza en 2005 con valores de 0,34 para COP 3 y 0,17 para COP 6, reflejando la energía consumida por unidad de servicio, y se prevé una disminución a 0,31 y 0,16 en 2050.

Otro parámetro clave es la probabilidad acumulada de desmantelamiento, que modela la retirada de tecnologías en función de su envejecimiento. Este valor aumenta progresivamente, desde 0% en el año base hasta 100% a los 25 años.

No obstante, la parametrización actual de la bomba de calor en el modelo openMASTER presenta varias limitaciones que impiden captar con precisión su potencial en la transición energética, y particularmente su contribución a las familias más vulnerables.

En primer lugar, no se distingue entre los diferentes tipos de bombas de calor, como aerotermia y geotermia, que tienen características técnicas, costes de instalación y requisitos de infraestructura distintos. Esta diferenciación es clave para diseñar políticas específicas y optimizar el despliegue de estas tecnologías. Además, al modelizar únicamente dos tecnologías con COPs de 3 y 6, se pierde la granularidad tecnológica necesaria para reflejar la amplia diversidad del parque de bombas de calor en España. Esto no solo ignora las tecnologías intermedias, sino que también dificulta el análisis de las trayectorias de mejora tecnológica, las cuales son esenciales para planificar un despliegue eficiente y realista.

También es importante señalar que el modelo, aunque sí que considera limitaciones demográficas y geográficas que condicionan el uso y despliegue de estas tecnologías, como la accesibilidad a recursos naturales (por ejemplo, agua o suelo adecuado para la geotermia) o la tendencia de las viviendas de nueva construcción en España, en la versión que se evalúa en este trabajo la demanda no está desagregada de forma que se permita dicho análisis. Su no consideración limita la capacidad del modelo para evaluar correctamente el impacto social y territorial del despliegue masivo de bombas de calor.

En conjunto, estas carencias evidencian la necesidad de mejorar la parametrización para que el modelo pueda ofrecer una representación más precisa y útil de las bombas de calor en el contexto de la transición energética.

5.4.2 ADAPTACIÓN AL MODELO

De cara a poder mejorar la parametrización previa descrita, se ha recopilado y calculado las proyecciones de diversas variables relacionadas con la capacidad e infraestructura, la eficiencia y rendimiento, su producción térmica y consumo energético, económicas y variables de capacidad máxima teórica. El desglose de dichas variables en detalle se puede encontrar en las Tablas 9 y 10.

Tras su recopilación y obtención se procede a implantarlo en el modelo openMASTER. A continuación, se expone en mayor detalle la metodología que se siguió para su óptima actualización y mejora.

I. *Nuevas variables introducidas*

Aprovechando la granularidad tecnológica de la herramienta como una de sus particularidades más valiosas, se puede reflejar el proceso de innovación tecnológica. Esto es posible gracias a su modelado *vintage* tecnológico el cual tiene en cuenta el año de fabricación de cada tecnología y su impacto en la eficiencia y las emisiones. Gracias a esta particularidad del openMASTER, se puede modelar la introducción de tecnologías más eficientes conforme las predecesoras se retiran del parque nacional de bombas de calor.

En el caso de la bomba de calor aerotérmica esta se introduce en la herramienta a través de cuatro tecnologías de cara a poder reflejar y parametrizar mejor su evolución pasada a través de los datos históricos y futura a través de las proyecciones obtenidas y recogidas en el apartado 5.3.

De cara a modelizar las tendencias pasadas de esta tecnología se introduce en el modelo las variables expuestas a continuación de tal forma que se refleje la diversidad que existe en el parque nacional de bombas de calor en lo que a eficiencia se refiere. Gracias a estas tres tecnologías se puede modelar el comportamiento pasado a través de los datos históricos pertenecientes a distintas fuentes oficiales ya comentadas.

- *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_LOW*: anteriormente descrita en este trabajo como *Aeroterminia COP bajo*, esta incluye el total de las bombas de calor aerotérmicas cuyo COP se encuentra en los intervalos 1-2 y 2-3. Esta tecnología presenta un número prácticamente nulo en todos los periodos ya que en estos existían otras alternativas con una eficiencia superior. Todos los datos incluidos a esta tecnología, incluyendo el número, potencia térmica, COP, SPF, capacidad máxima, entre otros, se detallan en la Tabla 9.
- *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_MID*: anteriormente descrita en este trabajo como *Aeroterminia COP medio*, esta incluye el total de las bombas de calor aerotérmicas cuyo COP se encuentra en los intervalos 3-4 y 4-5. Este tipo de bomba de calor aerotérmica entra en declive, especialmente en los últimos períodos, debido a su progresivo reemplazo por bombas de calor con una eficiencia superior. De igual modo, los resultados completos se muestran en la Tabla 9.

- *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_HIGH*: anteriormente descrita en este trabajo como *Aerothermia COP alto*, esta incluye el total de las bombas de calor aerotérmicas cuyo COP se encuentra en los intervalos 5-6 y 6-7. Su elevada penetración en los últimos períodos resalta su importancia durante las etapas finales del estudio. Nuevamente, los resultados se pueden consultar en la Tabla 9.

De forma similar, se incorporó al modelo otra tecnología destinada a representar el comportamiento futuro de las bombas de calor aerotérmicas, utilizando las proyecciones descritas y detalladas en el apartado 5.3.

- *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER*: anteriormente descrita en este trabajo como *Aerothermia COP promedio*. Esta tecnología es de gran relevancia a la hora de introducir el comportamiento futuro de la bomba de calor aerotérmica en el modelo openMASTER. De igual manera, todos los datos referidos a esta tecnología, incluyendo el número, potencia térmica, COP, SPF, capacidad máxima, entre otros, se detallan en la Tabla 9.

En cuanto al modelado de la bomba de calor geotérmica en la herramienta, este se realiza mediante una única tecnología, *sST_DSOTH_RES_HPCOP_GEO*, que representa tanto el comportamiento pasado como futuro para este tipo de bomba de calor. Esta simplificación se debe a que las bombas de calor geotérmicas constituyen un número reducido en comparación con las aerotérmicas, lo que hace innecesario reflejar una mayor granularidad tecnológica basada en los datos históricos como ocurre en el caso de la bomba de calor aerotérmica. Todos los datos referidos a esta tecnología, incluyendo el número, potencia térmica, COP, SPF, capacidad máxima, entre otros, se detallan en la Tabla 10.

Una vez incorporadas las cinco tecnologías que representan el comportamiento de las bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas en el modelo, es importante señalar que cada una de estas tecnologías permite cubrir tres usos finales específicos de la demanda residencial:

- *sES_DSOTH_RES_HEAT*: este uso final representa el uso de las bombas de calor para la calefacción residencial, proporcionando calor para mantener temperaturas confortables en los hogares durante los periodos fríos.

- *sES_DSOTH_RES_HTWA*: hace referencia a la producción de agua caliente sanitaria, destinada al consumo doméstico, como duchas, lavabos y otras necesidades de agua caliente.
- *sES_DSOTH_RES_COOL*: corresponde al uso de las bombas de calor para la refrigeración residencial, proporcionando aire frío para mantener una temperatura agradable en el hogar durante los meses más cálidos.

Finalmente, es importante destacar, como se mencionó en análisis previos, el rol clave del bloque Energy Services (*ES*) dentro del modelo, encargado de convertir la energía suministrada por las tecnologías del bloque Supply Technologies (*ST*) en servicios energéticos útiles para los consumidores finales. Estos servicios abarcan diversos sectores, incluyendo transporte, residencial, comercial e industrial, lo que garantiza una cobertura integral de la cadena de valor del sector energético.

Dado que la demanda residencial se encuentra estrechamente vinculada a la demanda comercial en el modelo, se decidió incluir las mismas tecnologías comentadas previamente para el sector residencial, pero aplicadas al sector comercial: *sST_DSOTH_SRV_HPCOP_AER_LOW*, *sST_DSOTH_SRV_HPCOP_AER_MID*, *sST_DSOTH_SRV_HPCOP_AER_HIGH*, *sST_DSOTH_SRV_HPCOP_AER*, y *sST_DSOTH_SRV_HPCOP_GEO*.

Sin embargo, cabe señalar que los valores parametrizados para estas tecnologías corresponden al análisis realizado en capítulos anteriores y están específicamente calculadas para el sector residencial. Por tanto, los resultados obtenidos se analizarán exclusivamente en el contexto del sector residencial, que es el objeto de estudio de este trabajo. Únicamente se ha considerado incluir estas variables para el sector comercial para facilitar, en el futuro, la parametrización y análisis detallado de estas tecnologías en dicho sector.

II. Actualización de los parámetros asociados a la bomba de calor

Como ya se ha comentado anteriormente, la parametrización actual de la bomba de calor en el modelo openMASTER presenta varias limitaciones que impiden captar con precisión su potencial en la transición energética, y particularmente su contribución a las familias más vulnerables. En este subapartado se comenta la implementación en el modelo openMASTER de los distintos parámetros que determinan el comportamiento pasado y futuro de la bomba de

calor. Para ello se han implementado nuevos valores de eficiencia que reflejan la obsolescencia de esta tecnología, así como su avance tecnológico, valores de capacidad históricos y límites de capacidad teóricos entre otros.

Nuevos valores de eficiencia

Los nuevos valores de eficiencia asignados a las bombas de calor reflejan los avances tecnológicos más recientes, así como su desempeño. Estos parámetros son clave ya que permiten capturar de manera más precisa su impacto en la reducción del consumo energético. La incorporación de estos nuevos parámetros no solo busca reflejar las condiciones actuales del mercado, sino que también pretende capturar la tendencia futura en términos de eficiencia energética. De manera previa en el modelo, la eficiencia se encontraba parametrizada a través del coeficiente de rendimiento también conocido como COP. No obstante, y dado que se disponían de datos históricos, se ha considerado para mejorar la parametrización de este atributo de la bomba de calor, emplear el factor de rendimiento estacional también conocido como SPF. Otra principal ventaja de emplear el SPF en lugar del COP, radica en su capacidad para reflejar de manera más precisa el rendimiento de las bombas de calor en un largo periodo de tiempo.

Por un lado, Mientras que el COP es un indicador instantáneo que refleja la eficiencia en condiciones específicas y en el corto plazo, el SPF permite incorporar dinámicas más complejas y realistas, como el envejecimiento de los equipos, las fluctuaciones en las condiciones climáticas y los avances tecnológicos que puedan surgir en el corto plazo. Al considerar estos factores, esta variable ofrece una representación más robusta del rendimiento en el largo plazo. Esto resulta especialmente relevante para modelos como openMASTER. Cabe destacar que el valor del SPF es un valor siempre inferior al capturado en el COP, dado que refleja el valor de un horizonte temporal superior.

Los valores introducidos en el modelo se pueden identificar en la Tabla 9 para el caso de la bomba de calor aerotérmica y la Tabla 10 para el caso de la bomba de calor geotérmica.

Nuevos valores económicos

De igual manera que con las variables de eficiencia, es necesario actualizar los parámetros económicos que determinan el coste de inversión y operación de la tecnología. En el caso de

los valores asociados a la inversión inicial, CAPEX (€/kW), esta variable se introduce en el modelo a través del coste de la inversión por kW instalado. Por otro lado, el coste de operación y mantenimiento, OPEX (€/kWh), se ha estimado a partir del valor medio del mercado spot de la electricidad para los años comprendidos entre 2014 y 2020 facilitados por Red Eléctrica de España asumiendo que los costes de mantenimiento son nulos.

Valores de capacidad introducidos

Los valores de capacidad han sido actualizados a través de los datos históricos del IDAE. Esto ha permitido obtener un *pathway* histórico. Por otro lado, como se describía en apartados anteriores, la determinación de límites de capacidad de cara al futuro permite una representación más realista del potencial y penetración de las bombas de calor. De esta forma, se introducen los límites antes calculados tanto para la bomba de calor aerotérmica como geotérmica.

5.4.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos con la nueva parametrización en el modelo openMASTER se han organizado en torno a distintas temáticas, las cuales se detallan y analizan en profundidad a continuación. La descripción de las variables empleadas por esta herramienta se detalla en el Anexo II.

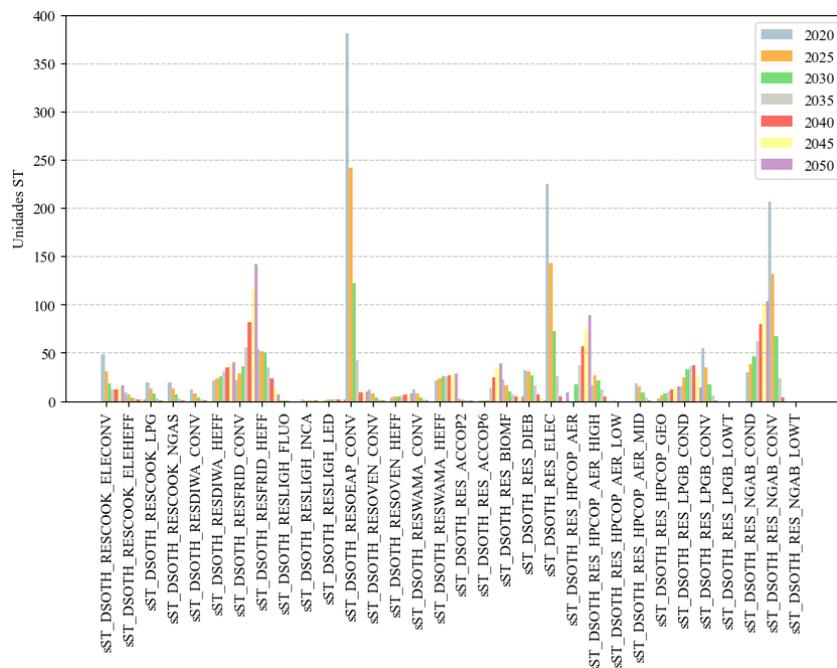
I. Evolución de la capacidad instalada en el sector residencial

En la Figura 13 se presenta la capacidad total instalada por tecnología de las *ST* para el sector residencial, desglosada según el periodo de estudio. La gráfica evidencia un crecimiento desigual entre las distintas tecnologías. Es importante señalar que no todas las tecnologías de suministro están expresadas en las mismas unidades de capacidad, unidades *ST*, lo que afecta la comparabilidad directa entre ellas.

Por un lado, destacan las variables relacionadas con sistemas de alumbrado residencial, como *sST_DSOTH_RESLIGH_INCA*, *sST_DSOTH_RESLIGH_FLUO* y *sST_DSOTH_RESLIGH_LED*, que se encuentran expresadas en términos de teralúmenes (Tlm). Por otro lado, se destacan las variables asociadas a electrodomésticos electrointensivos, como *sST_DSOTH_RESFRID_CONV*, *sST_DSOTH_RESFRID_HEFF*, *sST_DSOTH_RESOVEN_CONV*, *sST_DSOTH_RESOVEN_HEFF*,

$sST_DSOTH_RESWAMA_CONV$, $sST_DSOTH_RESWAMA_HEFF$, $sST_DSOTH_RESDIWA_CONV$ y $sST_DSOTH_RESDIWA_HEFF$, que incluyen frigoríficos, hornos, lavadoras y lavavajillas, y se encuentran expresadas en términos de millones de electrodomésticos (M aparatos). Debido a estas diferencias en las unidades, se opta por excluir estas tecnologías del análisis para garantizar una interpretación coherente de los resultados.

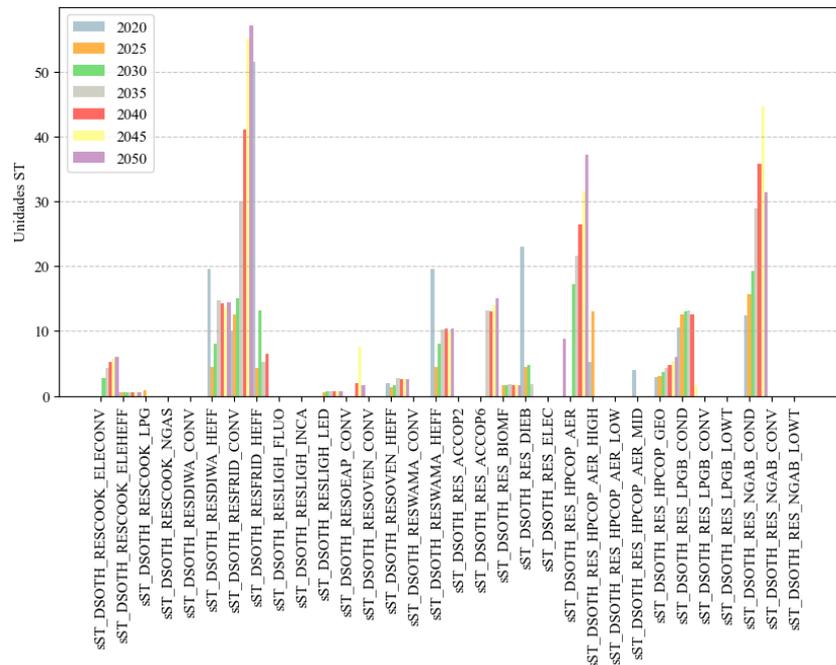
Figura 13: Evolución de la capacidad total instalada por tecnología de suministro y año en el sector residencial.



Elaboración propia a partir de [25].

El análisis de la nueva capacidad instalada según tecnología y año revela tres tendencias claras en la adopción de las distintas tecnologías residenciales, las cuales se ilustran en la Figura 14. Los datos más notables señalan que en el 2020 la tecnología con mayor capacidad instalada en cada periodo es la $sST_DSOTH_RES_DIEB$ (caldera de diésel), con 22,93 GW. Sin embargo, a partir del 2025, se produce un cambio significativo en la tendencia, con la $sST_DSOTH_RES_NGAB_COND$ (caldera de condensación de gas natural) liderando hasta el 2045, y alcanzando su máxima capacidad ese mismo año con 44,58 GW. Finalmente, en 2050, las bombas de calor aerotérmicas, $sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER$, emergen como la tecnología predominante en términos de nueva capacidad instalada, alcanzando 37,13 GW, lo que refleja su creciente adopción y preferencia dentro del sector residencial.

Figura 14: Evolución de la nueva capacidad instalada por tecnología de suministro y año en el sector residencial.

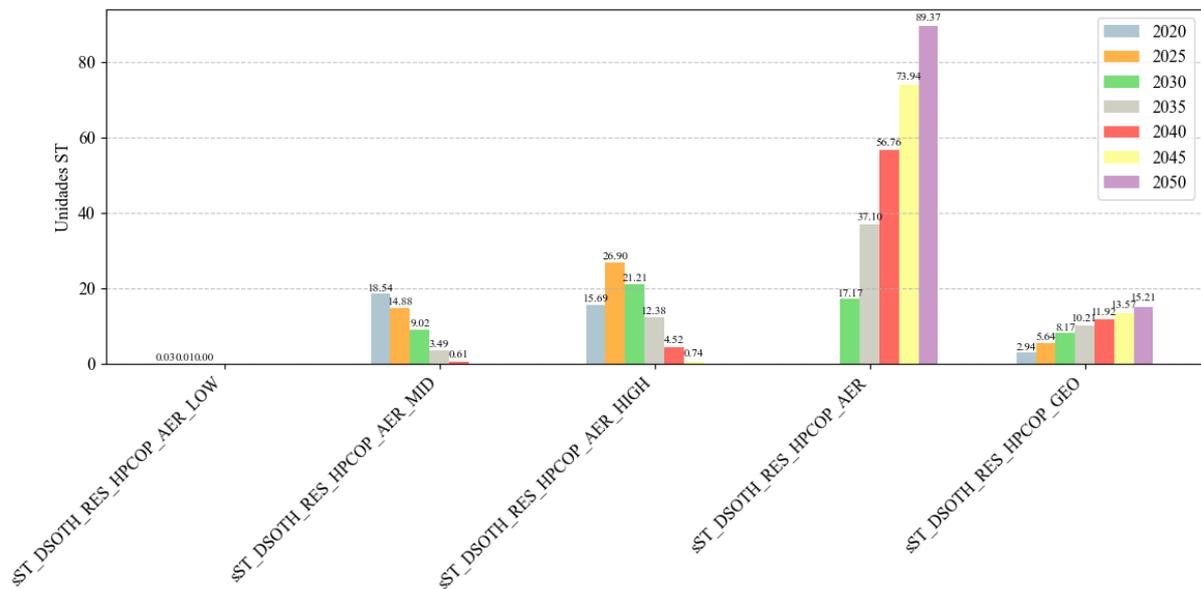


Elaboración propia a partir de [25].

De cara a poder analizar de manera más clara el despliegue de la bomba de calor, tanto para la aerotermia como la geotérmica, se muestra en la Figura 15 el detalle de la capacidad instalada total en el sector residencial según los distintos periodos analizados. Esta gráfica evidencia las tendencias que las bombas de calor podrán adoptar en el futuro.

De manera inicial se observa la casi nula presencia en todos los periodos de las bombas de calor aerotérmicas con bajo COP, *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_LOW*. De igual manera no experimenta un crecimiento significativo. Por otro lado, las bombas de calor con un COP medio, *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_MID*, muestran un decrecimiento gradual entre los periodos 2020-2040, alcanzando su máximo con 18,54 GW instalados en 2020. De manera similar ocurre con las bombas de calor con un COP alto, *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_HIGH*. Estas crecen de manera notable hasta el 2025 donde alcanzan su pico de 26,90 GW instalados y una vez alcanzado su máximo, se observa una tendencia decreciente.

Figura 15: Evolución de la capacidad total instalada de bombas de calor por año en el sector residencial.



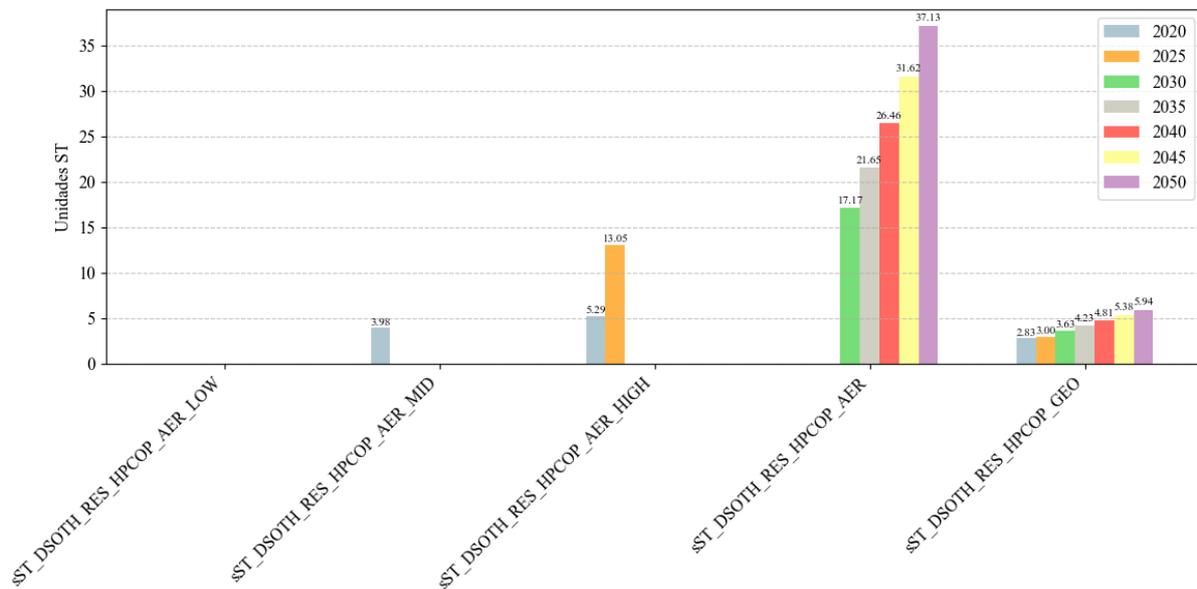
Elaboración propia a partir de [25].

En ambos casos, esta disminución de capacidad instalada se debe a un desplazamiento por tecnologías más eficientes, modeladas a través de las bombas de calor *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER*. Esta última tecnología emerge y se consolida como predominante en el sector residencial a partir de 2035. Su crecimiento es acelerado, alcanzando en 2050 con una capacidad instalada de 89,37 GW, lo que las posiciona como la opción más adoptada debido a su eficiencia y competitividad económica.

Finalmente, las bombas de calor geotérmicas *sST_DSOTH_RES_HPCOP_GEO*, presentan una adopción más estable pero considerablemente menor en comparación con las aerotérmicas, *ST_DSOTH_RES_HPCOP_AER*. Su capacidad máxima se logra en 2050 con 15,21 GW, reflejando un crecimiento moderado para este tipo de tecnología dadas sus limitaciones.

En relación con la nueva capacidad instalada por periodo, la Figura 16 evidencia una clara tendencia al alza en la adopción de las tecnologías de bomba de calor aerotérmica y geotérmica. Estas tecnologías se igualan a los límites teóricos establecidos en el quinto capítulo, lo que refleja su preferencia frente a otras alternativas dentro del sector residencial.

Figura 16: Nueva capacidad instalada de bombas de calor por año en el sector residencial.



Elaboración propia a partir de [25].

Por su parte, la bomba de calor geotérmica presenta una adopción más moderada en comparación con la aerotérmica. Esto se debe a que este tipo de bomba de calor, al aprovechar la energía almacenada en el subsuelo, presenta una gran barrera como lo es la disponibilidad de recursos, limitando considerablemente su expansión. En cuanto a la bomba de calor aerotérmica, esta muestra un crecimiento sostenido en todos los periodos, consolidándose como la tecnología predominante en la última etapa del horizonte temporal analizado.

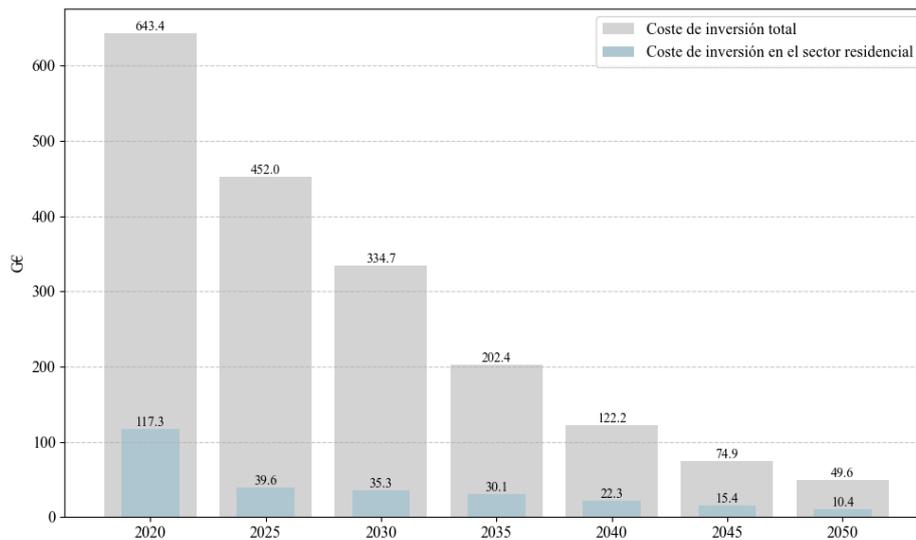
Estos resultados sugieren cómo factores como su alta eficiencia energética, su capacidad de proporcionar calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria de manera sostenible y sus relativos bajos costes en comparación con otras tecnologías la posicionan como tecnología clave a la hora de descarbonizar el sector residencial.

II. Análisis de costes de inversión

En cuanto al análisis de los costes de inversión asociados a las ST y más concretamente a las bombas de calor en el sector residencial, el modelo proporciona una visión integral sobre la dinámica de inversión, destacando las implicaciones tecnológicas y económicas que marcan el desarrollo de la demanda energética residencial en el horizonte 2020-2050.

La Figura 17 muestra la evolución del coste de inversión para este tipo de tecnologías a lo largo del periodo analizado. En ella se aprecia una notable disminución en el coste total de inversión, representado por las barras grises. Esto se debe a una combinación de un abaratamiento progresivo a lo largo del periodo de estudio, junto a un cambio en el mix de tecnologías basado en la optimización de la eficiencia.

Figura 17: Evolución del coste de inversión en tecnologías de suministro (ST) y su detalle en el sector residencial.

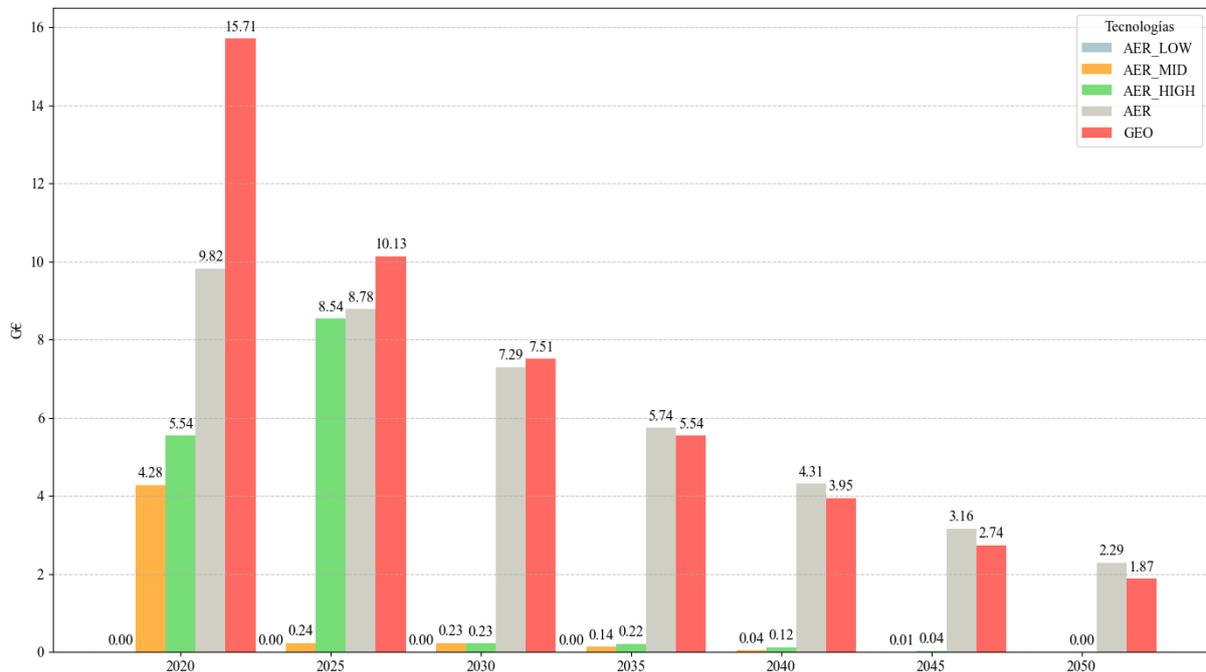


Elaboración propia a partir de [25].

Asimismo, se contrasta este valor con la inversión específica realizada en el sector residencial, destacada en las barras de un tono azulado. Esta gráfica permite visualizar la proporción destinada a este sector en comparación con la inversión total realizada. Concretamente se observa una disminución notable del coste total de todas las ST, al pasar de 452 mil millones de euros en 2025 a 49,6 mil millones de euros en 2050. Por su parte, el coste de inversión en el sector residencial también muestra una tendencia decreciente, al reducirse de 39,6 mil millones de euros en 2025 a 10,4 mil millones en 2050, lo que indica que este sector representa una proporción menor del coste total.

El desglose de los costes de inversión vistos previamente en el sector residencial, según la tipología de bomba de calor, se detalla en la Figura 18. En dicha gráfica destacan cinco categorías tecnológicas ya comentadas y descritas: *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_LOW*, *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_MID*, *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_HIGH*, *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER* y *sST_DSOTH_RES_HPCOP_GEO*.

Figura 18: Desglose de los costes de inversión según el tipo de bomba de calor en el sector residencial.



Elaboración propia a partir de [25].

Las tecnologías *sST_DSOTH_RES_HPCOP_GEO* y *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER* concentran los costes de inversión más elevados, particularmente en 2025, donde alcanzan 10,13 mil millones de euros y 8,78 mil millones de inversión respectivamente. Sin embargo, a lo largo del período analizado, dichos valores disminuyen, evidenciando una mayor eficiencia tecnológica y madurez del mercado. Para 2050, los valores finales se estiman en 1,87 mil millones de euros para la bomba geotérmica y 2,29 mil millones de euros para la aerotérmica.

Por otro lado, las tecnologías *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_LOW*, *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_MID* y *sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_HIGH* tienen costes nulos o muy reducidos, en comparación con las dos tecnologías anteriormente descritas. Esto evidencia una vez más, su futuro declive en el mercado residencial.

III. Potencial en la lucha contra la pobreza energética

Sin duda, la bomba de calor en sus distintas tecnologías se presenta como una opción de enorme potencial en el sector residencial, presentando múltiples soluciones en la mitigación de las

emisiones y la reducción del consumo energético. No obstante, uno de los principales desafíos asociados es el elevado coste asociado que presenta, lo que afecta especialmente a las familias más vulnerables, que suelen depender de sistemas de calefacción menos eficientes y más costosos en términos operativos, como los basados en combustibles fósiles.

La pobreza energética no es un concepto ajeno al caso de España, en base al Informe de Indicadores de Pobreza Energética en España (2023) [39] elaborado por la Cátedra de Energía y Pobreza de la Universidad Pontificia de Comillas, el 17% de los hogares presenta un gasto desproporcionado mientras que más del 20% una incapacidad patente de mantener una temperatura adecuada. Para el caso del indicador de gasto desproporcionado (2M), este indicador mide y el porcentaje de hogares que destinan más del doble del gasto relativo a la energía de la mediana nacional, mientras que la temperatura inadecuada, como se introducía, se entiende como la incapacidad declarada de mantener la temperatura adecuada en invierno. Estos indicadores, entre otros, son clave para medir la magnitud de la pobreza energética en un territorio, siendo ampliamente utilizados en estudios relativos a este ámbito.

En relación con las bombas de calor, su elevado coste inicial es la barrera principal para los hogares con menos recursos. Al reducir el coste de inversión mediante subvenciones, se facilita la adopción de estas tecnologías, permitiendo a las familias disminuir significativamente sus facturas energéticas a lo largo del tiempo y aumentar su capacidad para mantener sus hogares a una temperatura adecuada, reduciendo el riesgo de exclusión térmica. Adicionalmente, la promoción de bombas de calor subvencionadas no solo alivia la carga económica, sino que también mejora la salud y el bienestar de las familias.

Por consiguiente, las subvenciones para las bombas de calor son esenciales en la mitigación de la pobreza energética, ya que permiten que hogares vulnerables accedan a una tecnología más eficiente y económica a largo plazo. De esta forma, el papel del gobierno a través de estas iniciativas es clave en la transición hacia tecnologías de alta eficiencia energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose así con los objetivos de descarbonización y mejora de la calidad del aire.

De esta forma, se busca realizar una estimación en base a los resultados anteriores del total de subvención requerida por los organismos públicos, tanto nacionales como a nivel europeo,

necesario para que las familias en situación de pobreza energética tengan acceso a la tecnología de la bomba de calor.

En base a los resultados recogidos en la Figura 18, se puede obtener el total coste de inversión asociado a la tecnología de la bomba de calor dentro del sector residencial entre los años 2025-2050, considerando las cinco tecnologías descritas. En base a esto, el total del coste ascendería a 108,47 mil millones de euros, del cual el 55,3% viene representado por la bomba de calor aerotérmica, a través de sus distintas tecnologías, y el resto por la bomba de calor geotérmica.

Se toma como hipótesis que, debido a los altos costes de inversión asociados a la tecnología de geotermia, la tecnología empleada por los hogares identificados como vulnerables será la bomba de calor aerotérmica. En base a la Figura 16, la nueva capacidad total instalada comprendida entre los años 2025-2050 asciende a 186,17 GW, repartidas en 156,35 GW para la aerotermia y en 29,82 GW para la geotermia.

De esta forma, la capacidad de aerotermia total instalada durante este periodo representa un 84%. Tomando el indicador más elevado de los anteriores como aproximación del número de hogares en situación de pobreza energética, el de temperatura inadecuada con un 20,7% de los hogares en el 2023, y suponiendo como se comentaba anteriormente que estos hogares instalan únicamente bombas de calor aerotérmicas, el 24,6% del total de la capacidad de aerotermia antes calculada estará asociada a estas familias.

A partir de los resultados de la Figura 18, el coste de inversión total para el periodo 2025-2050 se sitúa en 108,47 mil millones de euros, representando en un 56,3% por la bomba de calor geotérmica. Estos resultados, en comparación con los comentados en relación con la capacidad, evidencian las grandes diferencias en cuanto a costes de inversión de estas tecnologías. En cuanto a la inversión media anual, esta supone un total de 2.441 millones de euros para las tecnologías basadas en aerotermia.

Como se detallaba en el cálculo del LOCH en apartados anteriores, las subvenciones se presentan actualmente en torno al 40% para la bomba de calor aerotérmica y en torno al 50% para la bomba de calor geotérmica. Para el caso de las familias vulnerables, estos porcentajes pueden aumentar hasta un 10% superior, el cual puede variar según la comunidad autónoma puesto que los criterios se adaptan a la situación local y las características particulares de sus

hogares considerados como vulnerables. De esta manera, y en base a los cálculos anteriores, se estima una inversión media anual necesaria de 300,8 millones de euros destinado a las familias vulnerables entre los años 2025 y 2050 para asegurar un acceso equitativo a la tecnología de la bomba de calor.

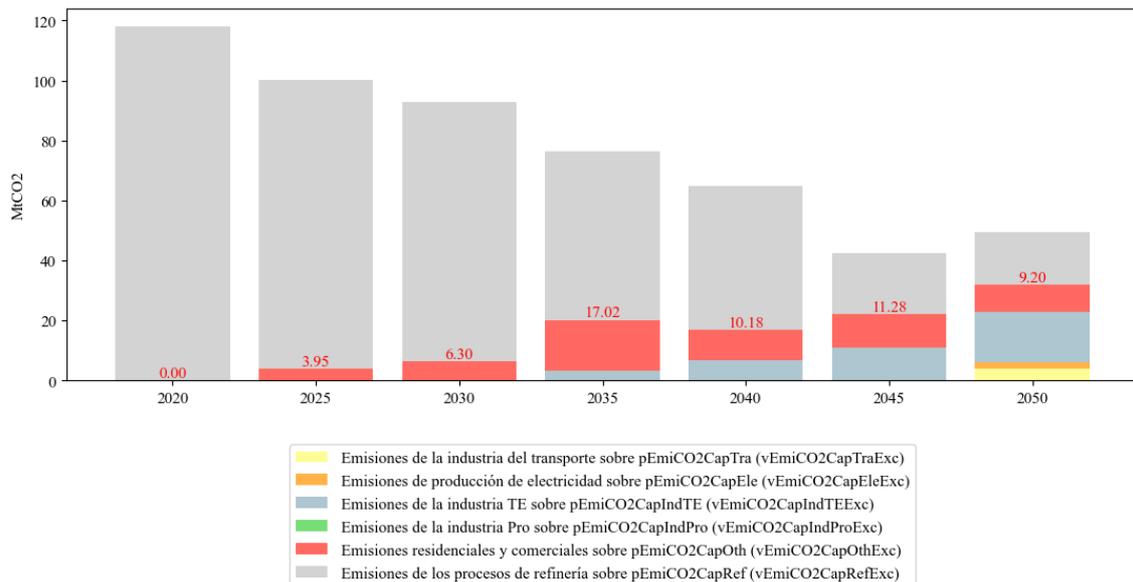
Este cálculo permite tener una magnitud del esfuerzo económico necesario para que el despliegue de esta tecnología sea efectivo de acuerdo con las proyecciones realizadas y los resultados obtenidos por el modelo, sin dejar atrás a un segmento tan significativo de la población como lo son las familias en situación de pobreza energética. De esta manera, se corrobora el papel clave de las instituciones públicas en la transición energética y la necesidad de crear fondos, como los fondos Next Generation EU, que destinen una fuerte inversión en tecnologías estratégicas como lo es la bomba de calor.

IV. Potencial de reducción de emisiones

En cuanto al análisis del potencial de descarbonización que presenta la bomba de calor se obtiene a través del modelo openMASTER una serie de resultados. En primer lugar, se observa el exceso de emisiones de CO₂ respecto al límite de carbono establecido según los distintos sectores y comprendido entre 2020-2050, mostrando la contribución de cada sector al excedente de emisiones de CO₂ y representado en la Figura 19.

En términos generales, se observa una disminución progresiva del exceso total a lo largo del tiempo, principalmente como consecuencia de la reducción en el exceso de emisiones en la industria del refino, posiblemente debido a avances tecnológicos y una disminución de la actividad en ese sector. Otros sectores, como el transporte, la producción de electricidad y las industrias de uso intensivo de energía, tienen una contribución menor al exceso en comparación, pero su participación se mantiene constante o aumenta ligeramente en los últimos periodos analizados. Destaca el sector residencial y comercial, como el sector donde se evidencia este decrecimiento de manera más significativa, alcanzando su pico de exceso de emisiones en 2035 con 17,02 MtCO₂ y un valor final de 9,2 MtCO₂ en 2050.

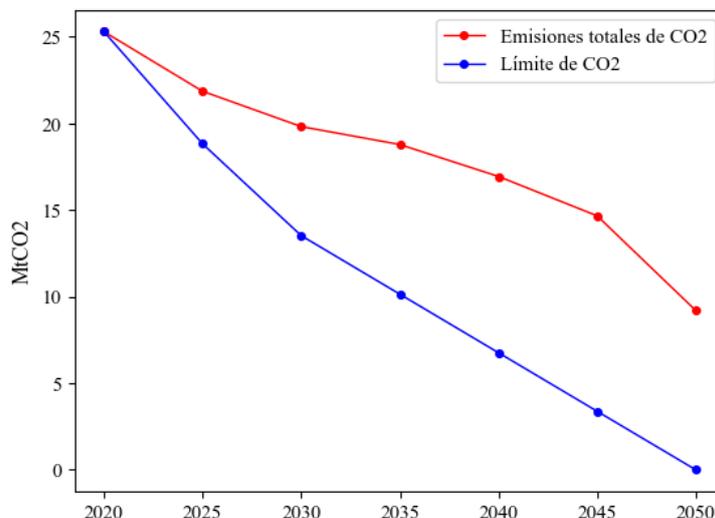
Figura 19: Exceso de emisiones de CO₂ respecto al límite de carbono según sector.



Elaboración propia a partir de [25].

De cara a poder analizar en mayor profundidad las emisiones de CO₂, se ha elaborado la Figura 20 a través de los resultados obtenidos por el modelo. Cabe destacar que en dicha gráfica se ha considerado únicamente las emisiones totales, representadas mediante la línea roja, debidas a la contribución exclusiva de las tecnologías de suministro en el sector residencial.

Figura 20: Evolución de las emisiones totales de CO₂ en el sector residencial y su comparación con el límite de CO₂ establecido según el Escenario PNIEC 2023-2050.



Elaboración propia a partir de [25].

Estas emisiones son comparadas con el límite de emisiones establecido en el escenario PNIEC 2023-2030 [3] junto con la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo [4] que busca la neutralidad climática de cara al 2050 y es representado en la figura mediante la línea azul. Aunque se observa una tendencia decreciente de emisiones a lo largo del periodo analizado, lo cual evidencia los avances en eficiencia energética y políticas de mitigación, estas emisiones se mantienen consistentemente por encima del límite de CO₂. Esto evidencia un incumplimiento de los objetivos climáticos establecidos.

Este análisis pone de manifiesto la limitación que suponen los límites de capacidad instalada para la tecnología de la bomba de calor en el modelo. Aunque esta tecnología es clave para cumplir con los objetivos de descarbonización debido a su alta eficiencia y bajas emisiones, las proyecciones actuales limitan su capacidad máxima instalada, lo cual obliga al modelo a recurrir a tecnologías alternativas con menores emisiones, como las *sST_DSOTH_RES_NGAB_COND* (caldera de condensación de gas natural), de cara a poder satisfacer la demanda energética total del sector residencial.

Estos resultados subrayan la necesidad de adoptar objetivos de mayor ambición de cara a la implementación y despliegue de la bomba de calor en España. De no hacerlo, será complejo alcanzar los límites de emisiones establecidos, teniendo en cuenta la insuficiencia por parte de las tecnologías actuales de cara a ser capaces de manera simultánea tanto de cubrir la demanda energética y descarbonizar.

Adicionalmente, el uso por parte del modelo de tecnologías basadas en el gas natural plantea la necesidad de apostar por el desarrollo de tecnologías basadas en gases renovables de cara a suplir las carencias de la bomba de calor. Este hallazgo resalta un desafío relevante en el diseño de políticas climáticas, ya que la descarbonización del sector residencial no puede recaer exclusivamente en una única tecnología. Por el contrario, queda evidenciado que es necesario combinar tanto el despliegue masivo de la bomba de calor junto al impulso de tecnologías renovables adicionales basadas en gases renovables, de cara a asegurar el cumplimiento de los objetivos climáticos establecidos por el PNIEC y desde la Unión Europea.

V. *Impacto de los límites de capacidad máxima*

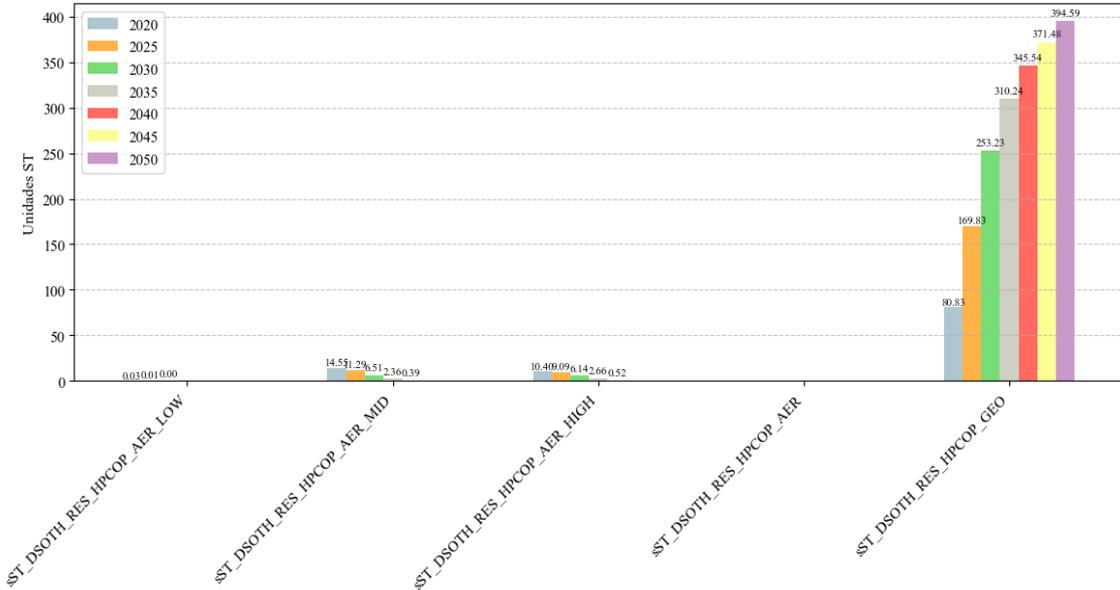
Finalmente, tal y como se ha comentado en el apartado anterior, es evidente que las estimaciones de capacidad máxima, descritas en mayor detalle en el apartado 5.2.5, condicionan el potencial de descarbonización que se puede lograr en el sector residencial. Aunque la consideración de dichos límites permite el cálculo de un escenario más realista de la implementación tecnológica de la bomba de calor, dichas restricciones de capacidad pueden limitar la consecución de los objetivos climáticos a largo plazo.

Con un fin académico, de cara a explorar el impacto que tendría la no consideración de estas limitaciones, se ha ejecutado en el modelo openMASTER un escenario sin considerar dichos límites de capacidad máxima para las bombas de calor aerotérmica y geotérmica. Gracias a este nuevo escenario de estudio, es posible analizar el potencial que presentan esta tecnología sin barreras adicionales, evaluando hasta qué punto su implementación masiva puede contribuir a alcanzar la neutralidad climática en 2050.

Los resultados obtenidos del total de la capacidad instalada al ejecutar el modelo openMASTER, sin considerar los límites teóricos de capacidad máxima para las bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas, se pueden consultar en la Figura 21. En este escenario, se observa que las bombas de calor geotérmicas, `sST_DSOTH_RES_HPCOP_GEO`, alcanzan un despliegue significativamente mayor en comparación con las aerotérmicas, `sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER`, llegando a alcanzar casi la cifra de 395 GW de capacidad instalada en 2050. Por el contrario, las bombas de calor aerotérmicas presentan un crecimiento nulo, destacando además de una representación casi marginal, especialmente en los últimos años analizados.

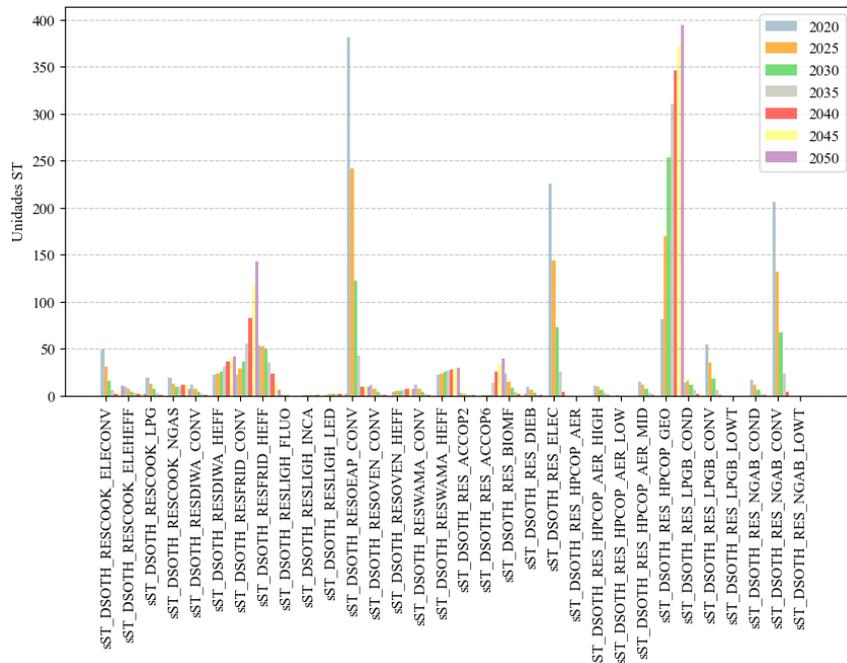
A la vista de estos resultados queda evidenciado que, tras la eliminación de las restricciones de capacidad, el modelo prioriza la implementación de tecnologías con mayor eficiencia energética, siendo la geotermia la mejor posicionada de entre todas las tecnologías de suministro pertenecientes al sector residencial, tal y como se refleja en la Figura 22.

Figura 21: Evolución de la capacidad total instalada de bombas de calor por año en el sector residencial, sin considerar los límites de capacidad máxima.



Elaboración propia a partir de [25].

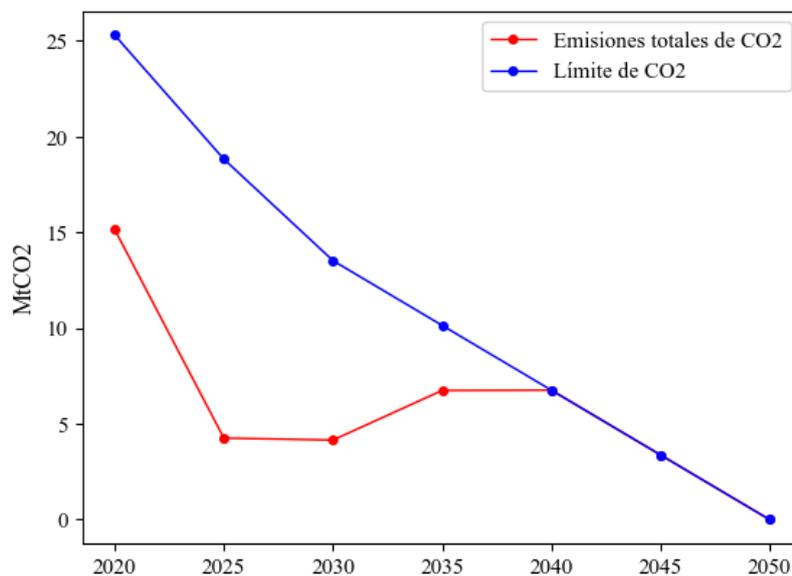
Figura 22: Evolución de la capacidad total instalada por tecnología de suministro y año en el sector residencial, sin considerar los límites de capacidad máxima.



Elaboración propia a partir de [25].

Finalmente, la senda de descarbonización del sector residencial sin la restricción de los límites de capacidad máxima para la tecnología de la bomba de calor se presenta en la Figura 23. Comparada con la Figura 20, en la que se incluían dichas restricciones, se aprecia una mejora significativa en el comportamiento del sistema en términos de reducción de emisiones, al ajustarse mejor a la senda descarbonización planteada desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [3] y alcanzando la neutralidad climática en el 2050.

Figura 23: Evolución de las emisiones totales de CO₂ en el sector residencial y su comparación con el límite de CO₂ establecido según el Escenario PNIEC 2023-2050, sin considerar los límites de capacidad máxima.



Elaboración propia a partir de [25].

En este nuevo escenario de estudio, las emisiones totales, se sitúan por debajo del límite de CO₂ durante gran parte del período analizado, excepto en el intervalo entre 2030 y 2035, donde se observa un ligero incremento. En comparación con los resultados anteriores, y especialmente en contraste con la Figura 20, este análisis refuerza la conclusión de que las bombas de calor tienen un papel fundamental en la descarbonización del sector residencial. No obstante, y dado que el despliegue contemplado en este escenario es muy poco realista, de cara a la consecución de los objetivos climáticos y de reducción de emisiones establecidos para el sector residencial, las autoridades deberán apostar por generar un impulso por el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en gases renovables que complementen a la bomba de calor, ya que la descarbonización del sector residencial no puede depender de manera exclusiva en una única tecnología.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles en España queda enmarcada bajo políticas clave como el Pacto Verde Europeo y el PNIEC, buscando fomentar tanto la mejora de la eficiencia energética como el fomento de vectores renovables, además de la Estrategia a Largo Plazo bajo el manto del Acuerdo de París. Bajo este contexto, la bomba de calor presenta un gran potencial dado que es una tecnología clave para impulsar la descarbonización del sector residencial. De esta manera, el propósito de este trabajo es investigar y evaluar el papel de las bombas de calor en el proceso de descarbonización del sistema energético en España, así como su impacto potencial en términos económicos y sociales. A través de este análisis, se busca proporcionar una visión integral sobre el papel de esta tecnología en la transición energética hacia un modelo más justo y equitativo.

Aunque hubo un crecimiento en las ventas de bombas de calor en España en 2023 (+ 31,60%), existen todavía desafíos importantes, el elevado coste de inversión, la competencia de las calderas de gas, los fondos regionales para la sustitución de calderas (los cuales muchas veces no priorizan tecnologías de alta eficiencia y bajas emisiones, como las bombas de calor, y en su lugar apoyan la instalación de calderas de gas más modernas), y la necesidad de seguir innovando en tecnología, entre otros. Sin embargo, gracias a las iniciativas gubernamentales, como los subsidios, pueden contribuir a superar el elevado coste de inversión, que representa una barrera de entrada significativa, especialmente para los colectivos más vulnerables.

Para modelar el potencial de la bomba de calor en el territorio nacional, el modelo openMASTER se presenta como una herramienta de gran valor añadido. Esta se presenta como una herramienta de equilibrio parcial dinámico y de programación lineal que optimiza la oferta energética a largo plazo, minimizando costes, reduciendo las emisiones de GEI y considerando el bienestar ciudadano y las implicaciones sociales de las políticas energéticas. No obstante, el modelo actual carece de una parametrización detallada que refleje adecuadamente el papel crítico de las bombas de calor en la transición energética, especialmente para familias vulnerables. Por consiguiente, una de las principales aportaciones de este trabajo es la implementación dentro del modelo de una parametrización que represente una imagen fiel y más actualizada para la tecnología de la bomba de calor.

I. Nueva parametrización para la bomba de calor

En cuanto a los resultados obtenidos para la parametrización de la bomba de calor aerotérmica y geotérmica destacan los siguientes hallazgos:

- *Aumento del número de plantas:* este crece de manera significativa, pasando de 4.381.545 en 2025 a 7.110.598 en 2050 en el caso de la aerotermia. En cuanto a la geotermia, el número de plantas crece significativamente, pasando de 4.075 en 2025 a 9.656 en 2050. Ambos crecimientos reflejan una adopción significativa.
- *Mejora de la eficiencia energética:* el COP y el SPF promedio para la aerotermia muestra una mejora constante, aumentando de 5,69 en 2025 a 5,99 en 2050 y de 3,55 en 2025 a 5,36 en 2050 respectivamente. Para el caso de la geotermia, tanto su COP y su SPF muestra una mejora, aumentando de 8,13 en 2025 a 8,56 en 2050 y de 5,01 en 2025 a 6,29 en 2025 respectivamente.
- *Producción térmica y consumo eléctrico:* la producción térmica crece significativamente para la aerotermia, alcanzando 10.874.480 MWh en 2050, mientras que el consumo eléctrico muestra una tendencia decreciente a partir de 2050, reflejando una mayor eficiencia en el uso de electricidad para generar calor. En el caso de la geotermia, la producción térmica crece también significativamente, pasando de 131.274 MWh en 2025 a 331.542 MWh en 2050, mientras que el consumo eléctrico también aumenta, alcanzando 65.396 MWh en 2050.
- *Reducción de costes:* en la aerotermia la inversión inicial disminuye considerablemente, de 693 €/kW en 2025 a 540 €/kW en 2050. Esto se traduce en una reducción notable del LCOH, que cae de 100,12 €/MWh en 2025 a 83,05 €/MWh en 2050. De manera análoga, la inversión en la geotermia disminuye notablemente de 4.958 €/kW en 2025 a 3.902 €/kW en 2050, haciendo esta tecnología más accesible económicamente. De igual manera, esto se traduce en una reducción del LCOH, que pasa de 76,62 €/MWh en 2025 a 63,17 €/MWh en 2050, reforzando su competitividad frente a otras tecnologías.
- *Potencial de mercado:* en cuanto a la capacidad máxima proyectada para la aerotermia, esta crece de 13,05 GW en 2025 a 37,13 GW en 2050, alineándose con la tendencia

creciente en el número de hogares. La geotermia también incrementa su máximo teórico pasando de 3,00 GW en 2025 a 5,94 GW en 2050 respaldado por un incremento en la proyección del número de viviendas completadas.

Esta nueva parametrización proporciona una visión holística del panorama actual y futuro de las bombas de calor, permitiendo alcanzar un análisis más profundo de esta tecnología y de sus avances en eficiencia, reducción del consumo energético y disminución de costes. Además, facilita la implementación de una representación más precisa y actualizada en el modelo openMASTER, incorporando tanto datos históricos como estimaciones futuras para reflejar de manera más fiel su impacto en el ámbito residencial en España.

II. Resultados obtenidos a través del modelo openMASTER

A partir del análisis de la capacidad instalada en el sector residencial, se observa una clara transición tecnológica hacia las bombas de calor, particularmente las aerotérmicas, como la opción predominante. Aunque las calderas de diésel lideraron la capacidad instalada en 2020, y las calderas de condensación de gas natural dominaron hasta 2045, las bombas de calor aerotérmicas emergen como la tecnología principal en 2050, alcanzando 89,37 GW de capacidad instalada, gracias a su alta eficiencia energética y competitividad económica.

Estos resultados subrayan cómo las bombas de calor aerotérmicas, con su capacidad para proporcionar calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria de manera sostenible, se consolidan como una tecnología clave para la descarbonización del sector residencial. Además, la alineación de la nueva capacidad instalada con los límites teóricos proyectados refuerza su preferencia frente a otras tecnologías, destacando su papel fundamental en la transición energética.

El análisis de costes de inversión asociado a las tecnologías de suministro en el sector residencial presenta una tendencia decreciente, tanto en los costes totales como en los específicos del sector residencial. El coste total de inversión disminuye drásticamente de 452 mil millones de euros en 2025 a 49,6 mil millones en 2050. Por otro lado, la inversión en el sector residencial también se reduce, pasando de 39,6 mil millones de euros en 2025 a 10,4 mil millones en 2050, lo que subraya una menor proporción del coste total atribuido a este sector.

Por otro lado, este análisis detalla los costes por tipología de bomba de calor, evidenciando que las tecnologías aerotérmicas y geotérmicas concretan grandes inversiones en 2025, con 8,78 mil millones de euros y 10,13 mil millones respectivamente. Sin embargo, estos valores disminuyen de forma significativa hasta 2050, alcanzando 2,29 mil millones para las aerotérmicas y 1,87 mil millones para las geotérmicas.

Este comportamiento refleja no solo la madurez del mercado, sino también el declive de tecnologías menos eficientes como las bombas de calor de bajo y medio COP, que presentan costes marginales o nulos a lo largo del periodo estudiado. Esto último evidencia la transición hacia un mercado dominado por bombas de calor de alta eficiencia además del impacto positivo de los avances tecnológicos en la reducción de costes.

En cuanto al análisis sobre el potencial en la lucha contra la pobreza energética, la bomba de calor emerge como una solución clave para abordarla en España, al combinar eficiencia energética y reducción de emisiones con beneficios económicos y sociales para los hogares vulnerables. Sin embargo, el principal desafío es el elevado coste inicial de estas tecnologías, especialmente significativo para familias en situación de vulnerabilidad. Según el Informe de Indicadores de Pobreza Energética en España (2023), más del 20% de los hogares no pueden mantener una temperatura adecuada, destacando la magnitud del problema. Por consiguiente, las subvenciones gubernamentales son esenciales para superar esta barrera económica, permitiendo que las familias vulnerables accedan a estas tecnologías, reduzcan sus facturas energéticas y mejoren su calidad de vida, incluyendo salud y bienestar. Esto también fortalece los objetivos de descarbonización y mejora de la calidad del aire.

Este análisis detalla que entre 2025 y 2050, el coste total para implementar bombas de calor en el sector residencial ascenderá a 108,47 mil millones de euros, representado en un 56,3% por la bomba de calor aerotérmica gracias a más de 156 GW instalados, un 84% de la capacidad instalada entre 2025-2050. De este total las familias vulnerables deberían aportar aproximadamente 601,61 millones anuales, suponiendo que únicamente se instalan bombas de calor aerotérmicas para estos casos. Con un esquema de subvenciones que alcanzaría hasta el 50% para esta tecnología, la inversión anual gubernamental necesaria sería de 300,80 millones de euros entre 2025 y 2050. Este esfuerzo subraya la importancia de políticas públicas robustas

y fondos estratégicos, como los Next Generation EU, para garantizar un despliegue equitativo de esta tecnología sin dejar atrás a los hogares más vulnerables.

En base al análisis anterior, se subraya la necesidad de una intervención activa por parte del gobierno central para garantizar que los hogares más vulnerables puedan acceder a esta tecnología altamente eficiente, a través de un esquema de ayudas económicas que elimine las barreras iniciales de adopción. Además de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y alinearse con los objetivos de descarbonización, las bombas de calor también ofrecen beneficios adicionales en términos de reducción de la pobreza energética, mejora de la calidad del aire y aumento del bienestar y la salud de las familias en riesgo de exclusión.

El análisis del potencial de descarbonización de la bomba de calor resalta su papel clave para cumplir con los objetivos climáticos establecidos, aunque aún enfrenta importantes desafíos. A lo largo del periodo 2020-2050, se observa una progresiva reducción del exceso de emisiones de CO₂ en los diferentes sectores, con una disminución significativa en la industria del refino debido a avances tecnológicos y menor actividad en el sector. Sin embargo, el sector residencial y comercial destaca como el mayor contribuyente al exceso de emisiones, alcanzando un pico de 17,02 MtCO₂ en 2035 y reduciéndose hasta 9,2 MtCO₂ en 2050.

Aunque las emisiones totales del sector residencial muestran una tendencia decreciente, estas siguen superando consistentemente el límite establecido por el escenario PNIEC 2023-2050, evidenciando un incumplimiento de los objetivos de neutralidad climática. Este incumplimiento se debe, en parte, a los límites en la capacidad instalada de las bombas de calor en el modelo, lo que obliga a recurrir a tecnologías alternativas como las calderas de condensación de gas natural para satisfacer la demanda energética. Los resultados subrayan la necesidad de adoptar objetivos más ambiciosos para el despliegue de bombas de calor y de apostar por tecnologías basadas en gases renovables que complementen esta solución.

De esta manera, se manifiesta que la descarbonización del sector residencial no puede depender exclusivamente de una sola tecnología, sino de una combinación de opciones renovables que permitan reducir las emisiones y garantizar el cumplimiento de los objetivos climáticos.

Finalmente, el análisis del impacto de los límites de capacidad máxima en el despliegue de bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas revela cómo estas restricciones condicionan significativamente el potencial de descarbonización del sector residencial.

En un escenario alternativo sin límites de capacidad, las bombas de calor geotérmicas alcanzan una capacidad instalada de casi 395 GW en 2050, superando ampliamente a las aerotérmicas, cuya contribución resulta marginal. Esto pone de manifiesto la prioridad otorgada por el modelo openMASTER a las tecnologías con mayor eficiencia energética cuando se eliminan las barreras de capacidad. Los resultados evidencian que, sin restricciones, las emisiones de CO₂ en el sector residencial se reducen considerablemente, llegando a situarse por debajo de los límites establecidos por el PNIEC durante la mayor parte del periodo analizado, salvo entre 2030 y 2035, donde se registra un ligero incremento. Sin embargo, este escenario idealista subraya la necesidad de políticas ambiciosas que fomenten tanto la adopción masiva de bombas de calor como el desarrollo de tecnologías basadas en gases renovables.

Este enfoque integral es esencial para complementar el potencial de descarbonización de las bombas de calor y garantizar la transición hacia un sector residencial climáticamente neutro y alineado con los objetivos nacionales e internacionales de reducción de emisiones.

En definitiva, estos resultados se presentan como una argumentación sólida a favor de la bomba de calor como tecnología clave en la descarbonización del sector residencial, así como una oportunidad estratégica, especialmente para los hogares más vulnerables, para minimizar los costes de la energía. Sin duda este análisis confirma un sólido futuro para esta tecnología en el ámbito nacional, debido a su elevada eficiencia, tanto presente como futura, y el amplio apoyo gubernamental que presenta a través de medidas. Aunque la implementación de esta tecnología pueda requerir de subvenciones iniciales para posicionarse de forma competitiva, en el largo plazo se espera una considerable reducción del coste de inversión inicial como consecuencia de las economías de escala y su progresivo grado de madurez.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Europea, Dirección General de Comunicación, (2021). *Pacto Verde Europeo: consecución de nuestros objetivos*, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- [2] Unión Europea. (2012). Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE y se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE. Diario Oficial de la Unión Europea, L 315, 1-56.
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Borrador de actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030*.
- [4] Gobierno de España. (2020). *Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- [5] Gobierno de España. (2021). *Real Decreto 477/2021, de 29 de junio, por el que se regula la concesión directa de ayudas para energías renovables en autoconsumo, almacenamiento y térmicas, sector residencial, en el marco del Plan de Recuperación, transformación y Resiliencia financiado por la Unión Europea*. Boletín Oficial del Estado, núm. 155, de 30 de junio de 2021, páginas 76728 a 76777.
- [6] Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764.
- [7] Borge-Diez, D., Icaza, D., Trujillo-Cueva, D. F., & Açikkalp, E. (2022). Renewable energy driven heat pumps decarbonization potential in existing residential buildings: Roadmap and case study of Spain. *Energy*, 247, 123481.
- [8] Grassi, W. (2017). *Heat pumps: fundamentals and applications*. Springer .
- [9] IIT Kharagpur. (s.f.). *40 lessons on refrigeration and air conditioning: Useful training material for mechanical engineering students/college, or as reference for engineer*.

- [10] Abdulmawlay, R. A., Masheiti, S. A., & Bodalal, A. S. (2020). An evaluation of R134a and R477 as the working fluid in vapour compression cycle by electrical source of 1MW. *International Journal of Scientific Research*, 9(1), 1554.
- [11] UNE. (2019). *UNE-EN 14511-1:2019. Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor para la calefacción y la refrigeración de locales y enfriadoras de proceso con compresores accionados eléctricamente. Parte 1: Términos y definiciones.* Asociación Española de Normalización (UNE).
- [12] Çakır, U., Çomaklı, K., Çomaklı, Ö., & Karşlı, S. (2013). An experimental exergetic comparison of four different heat pump systems working at same conditions: As air to air, air to water, water to water and water to air. *Energy*, 58, 210-219.
- [13] Wang, Z., Luther, M. B., Amirkhani, M., Liu, C., & Horan, P. (2021). State of the art on heat pumps for residential buildings. *Buildings*, 11(8), 350.
- [14] AFEC. (2024). *Informe anual de mercado y coyuntura sectorial 2023: Climatización, HVAC y bombas de calor.* AFEC.
- [15] European Heat Pump Association (EHPA). (2024). *Pump it down: Why heat pump sales dropped in 2023.* EHPA.
- [16] Comisión Europea. (2022). *Plan REPowerEU (COM(2022) 230 final).* Bruselas: Comisión Europea.
- [17] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2019). *Estrategia Nacional Contra la Pobreza Energética 2019-2024.* Gobierno de España.
- [18] International Energy Agency (2019). *World Energy Outlook 2019.* IEA.
- [19] Thomson, H., Snell, C., & Bouzarovski, S. (2017). Health, Well-Being and Energy Poverty in Europe: A Comparative Study of 32 European Countries. *International journal of environmental research and public health*, 14(6), 584.

- [20] Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, 10, 31-40.
- [21] Fizaine, F., & Kahouli, S. (2019). On the power of indicators: How the choice of fuel poverty indicator affects the identification of the target population. *Applied Economics*, 51(11), 1081-1110.
- [22] Castaño-Rosa, R., Solís-Guzmán, J., Rubio-Bellido, C., & Marrero, M. (2019). Towards a multiple-indicator approach to energy poverty in the European Union: A review. *Energy and Buildings*, 193, 36–48.
- [23] Herrero, S. T. (2017). Energy poverty indicators: A critical review of methods. *Indoor and Built Environment*, 26(7), 1018-1031.
- [24] Romero Mora, J. C., Barrella, R., & Centeno Hernández, E. (2023). *Informe de Indicadores de Pobreza Energética en España 2022*. Pontificia Universidad Comillas.
- [25] Rodríguez-Matas, A. F., Pérez-Bravo, M., Linares, P., & Romero, J. C. (2024). *openMASTER: The open source Model for the Analysis of SusTainable Energy Roadmaps*. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101456.
- [26] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (s.f.). *Estadísticas de bombas de calor en España*.
- [27] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2016). *Síntesis del estudio parque de bombas de calor en España: Estudios IDAE 001*. IDAE.
- [28] Heptonstall, P., & Winskel, M. (2023). *Decarbonising home heating: An evidence review of domestic heat pump installed costs* [Research Report]. UKERC, Imperial College London y University of Edinburgh.
- [29] Kirchgässner, G., Wolters, J., & Hassler, U. (2012). *Introduction to modern time series analysis*. Springer Science & Business Media.

- [30] Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and applications* (3.^a ed.). John Wiley & Sons.
- [31] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice* (2.^a ed.). OTexts.
- [32] Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21).
- [33] U.S. Department of Energy. (2024). *Bombas de calor geotérmicas*. Recuperado de <https://www.energy.gov/energysaver/bombas-de-calor-geotermicas>.
- [34] Gobierno de España. (2021). *Real Decreto 477/2021, de 29 de junio, por el que se regula la concesión directa de ayudas a las comunidades autónomas y a las ciudades de Ceuta y Melilla para la ejecución de programas de incentivos ligados al autoconsumo y al almacenamiento con fuentes de energía renovable, así como a la implantación de sistemas térmicos renovables en el sector residencial, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia*. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*, núm. 155, de 30 de junio de 2021, páginas 80300-80336.
- [35] Bosch. (2024). Subvenciones para aerotermia. *Junkers Bosch España*. Recuperado de <https://www.junkers-bosch.es/conocimiento/aerotermia/subvenciones-aerotermia/>.
- [36] Lorenzo Martín, L. (2024). *¿Cuánto cuesta una bomba de calor para casa en 2025?*. Preciogas. Recuperado de <https://preciogas.com/instalaciones/equipamiento/bombas-de-calor/precios>.
- [37] Energanova. (2024). *Precio de una instalación con bomba de calor geotérmica*. Recuperado de <https://energanova.es/precio-de-una-instalacion-con-bomba-de-calor-geotermica/>.
- [38] Asociación Hipotecaria Española. (2024). *Boletín estadístico trimestral: Segundo trimestre de 2024*. Asociación Hipotecaria Española.

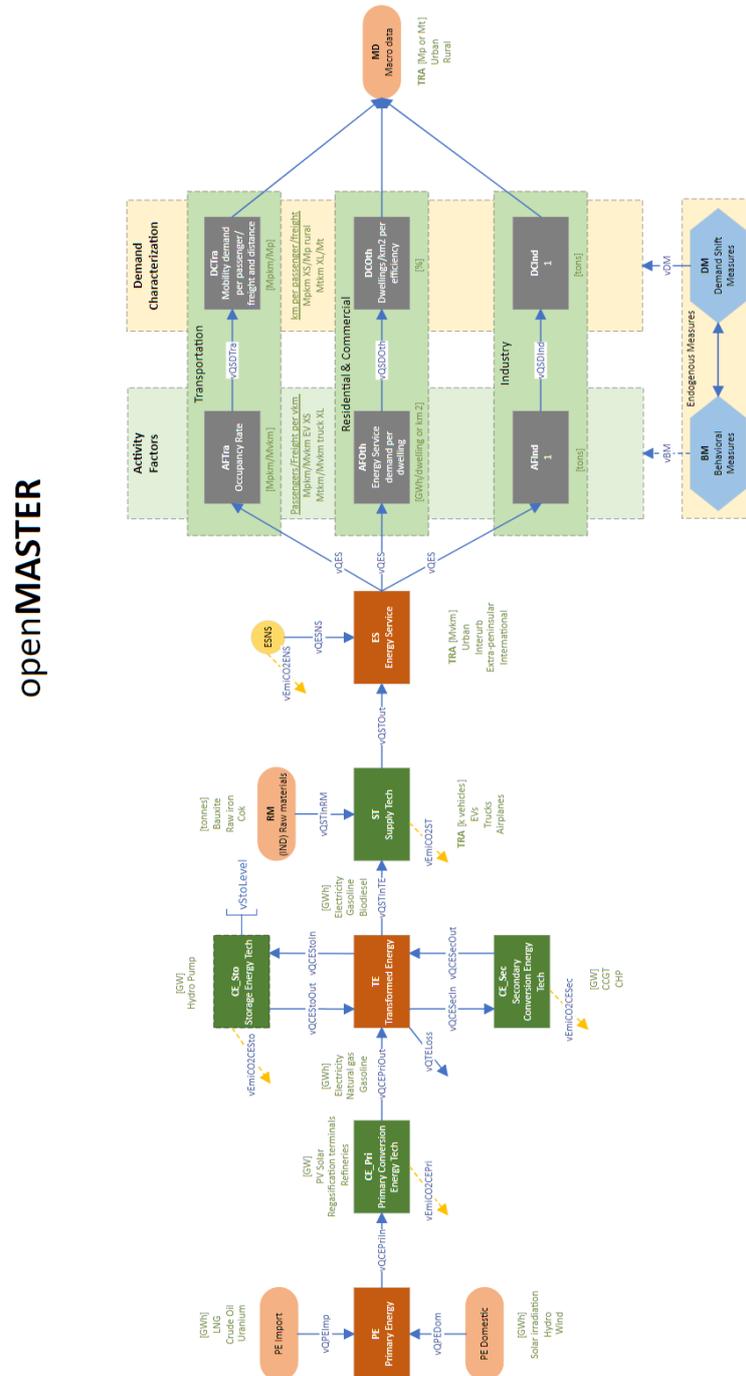
[39] Cátedra de Energía y Pobreza. (2024). *Informe de Indicadores de Pobreza Energética en España 2023*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas.

[40] Naciones Unidas. (2024). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>.

Capítulo 8. ANEXOS

ANEXO I: DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL MODELO OPENMASTER

Figura 24: Diagrama conceptual del modelo openMASTER.



Obtenido de [25].

ANEXO II: DICCIONARIO DE VARIABLES DEL MODELO OPENMASTER

Tabla 11: Diccionario de variables del modelo openMASTER.

Categorías	Variable en el openMASTER	Descripción de la tecnología	Unidades equivalentes a una unidad ST
I Calderas	<i>sST_DSOTH_RES_DIEB</i>	Caldera diésel residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_NGAB_CONV</i>	Caldera de gas natural convencional residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_NGAB_LOWT</i>	Caldera de gas natural de baja temperatura residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_NGAB_COND</i>	Caldera de gas natural de condensación residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_LPGB_CONV</i>	Caldera de gas licuado de petróleo convencional residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_LPGB_LOWT</i>	Caldera de gas licuado de petróleo de baja temperatura residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_LPGB_COND</i>	Caldera de gas licuado de petróleo de condensación residencial	GW
II Bombas de calor	<i>sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_LOW</i>	Bomba de calor aerotérmica de bajo COP residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_MID</i>	Bomba de calor aerotérmica de COP medio residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER_HIGH</i>	Bomba de calor aerotérmica de alto COP residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_HPCOP_AER</i>	Bomba de calor aerotérmica COP residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_HPCOP_GEO</i>	Bomba de calor geotérmica residencial	GW
III Otros sistemas de calefacción y refrigeración	<i>sST_DSOTH_RES_ELEC</i>	Resistiva eléctrica residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_BIOMF</i>	Calefacción biomasa residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_ACCOP2</i>	Aire acondicionado COP 2 residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RES_ACCOP6</i>	Aire acondicionado COP 6 residencial	GW
IV Iluminación	<i>sST_DSOTH_RESLIGH_INCA</i>	Iluminación bombillas incandescentes residencial	Tlm
	<i>sST_DSOTH_RESLIGH_FLUO</i>	Iluminación bombillas fluorescentes residencial	Tlm
	<i>sST_DSOTH_RESLIGH_LED</i>	Iluminación bombillas LED residencial	Tlm
V Electrodomésticos	<i>sST_DSOTH_RESFRID_CONV</i>	Refrigeradores convencionales residencial	M aparatos
	<i>sST_DSOTH_RESFRID_HEFF</i>	Refrigeradores de alta eficiencia residencial	M aparatos
	<i>sST_DSOTH_RESOVEN_CONV</i>	Hornos convencionales residencial	M aparatos
	<i>sST_DSOTH_RESOVEN_HEFF</i>	Hornos de alta eficiencia residencial	M aparatos
	<i>sST_DSOTH_RESWAMA_CONV</i>	Lavadoras convencionales residencial	M aparatos
	<i>sST_DSOTH_RESWAMA_HEFF</i>	Lavadoras de alta eficiencia residencial	M aparatos
	<i>sST_DSOTH_RESDIWA_CONV</i>	Lavavajillas convencionales residencial	M aparatos
	<i>sST_DSOTH_RESDIWA_HEFF</i>	Lavavajillas de alta eficiencia residencial	M aparatos
	<i>sST_DSOTH_RESOEAP_CONV</i>	Otros electrodomésticos eléctricos convencionales residencial	GW
VI Cocinas	<i>sST_DSOTH_RESCOOK_NGAS</i>	Cocina con gas natural residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RESCOOK_LPG</i>	Cocina con gas licuado de petróleo residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RESCOOK_ELECONV</i>	Cocina eléctrica convencional residencial	GW
	<i>sST_DSOTH_RESCOOK_ELEHEFF</i>	Cocina eléctrica de inducción de alta eficiencia residencial	GW

Elaboración propia.

ANEXO III: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos en 2015 por las Naciones Unidas, constituyen una hoja de ruta global para abordar los principales desafíos sociales, económicos y ambientales a los que se enfrenta la humanidad. Estos objetivos buscan garantizar un equilibrio entre el desarrollo sostenible, la preservación del medio ambiente y la mejora de la calidad de vida de las personas, promoviendo soluciones integrales e inclusivas [40]. Concretamente este trabajo se encuentra especialmente alineado con los siguientes objetivos:

- *ODS 1 - Fin de la pobreza*: dentro de la lucha contra la pobreza energética, es destacable el papel de las bombas de calor garantizando que los hogares vulnerables tengan acceso a energía asequible y mejorando por extensión la calidad de sus vidas. [40]
- *ODS 7 - Energía asequible y no contaminante*: el análisis de la bomba de calor como tecnología clave para descarbonizar el sector residencial refleja un esfuerzo directo por promover el acceso a sistemas energéticos más limpios, eficientes y sostenibles. [40]
- *ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles*: el despliegue de tecnologías como la bomba de calor en el sector residencial tiene un impacto directo en mejorar la sostenibilidad de las ciudades y comunidades, reduciendo su huella ambiental y garantizando el acceso a energía limpia y eficiente para todos. [40]
- *ODS 13 - Acción por el clima*: la evaluación del potencial de reducción de emisiones de CO₂ y el impacto en la lucha contra la pobreza energética refuerzan la alineación con este objetivo. Este análisis enfatiza el potencial de las bombas de calor para mitigar el cambio climático y alcanzar la neutralidad climática en 2050. [40]