



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, TÉRMICA Y
DE FLUIDOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Análisis comparativo de sistemas de calefacción residencial: Bomba de calor versus micro-cogeneración

Autor

Juan Ignacio Ros Ruiz

Tutor

Antonio Atienza Márquez

Cotutor

Francisco Angel Fernandez Hernandez

21 de junio de 2025

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años de carrera. Gracias por escucharme, por motivarme y por animarme siempre a ser fiel a mis principios. Soy quien soy gracias a vosotros. En especial, a mi hermano —mi tete—, mi luz y mi faro en la vida: gracias por ser siempre mi guía.

A mis amigos, tanto a los que me acompañan desde la infancia como a aquellos que conocí durante estos años en la Universidad de Málaga, gracias por vuestro cariño constante. Habéis hecho de esta etapa una experiencia inolvidable, una verdadera aventura llena de momentos que llevaré siempre conmigo.

Finalmente, quiero agradecer a todos aquellos profesores que viven la docencia con pasión, que transmiten conocimiento con vocación genuina y cuyo único propósito es generar un impacto positivo en sus estudiantes. He tenido la suerte de encontrarme con algunos de ellos, y siempre he intentado hacerles saber lo valioso de su labor. Hoy, quiero dejar constancia de ello aquí: gracias Daniel, gracias Paco, gracias Ignacio, gracias Kiko, gracias Paloma, gracias Antonio y gracias Edu. Os habéis ganado mi respeto por demostrar amor auténtico por lo que hacéis, en un mundo donde la mediocridad suele pasar desapercibida.

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado presenta un análisis comparativo entre dos tecnologías de climatización residencial: la bomba de calor aire-agua y la micro-cogeneración basada en pila de combustible de hidrógeno. En el contexto de la transición energética impulsada por el Pacto Verde Europeo, se evalúa la viabilidad técnica, energética y económica de ambas soluciones aplicadas a una vivienda unifamiliar, modelada y simulada en el entorno TRNSYS. Se analizan distintos escenarios climáticos representativos de Europa (Berlín, París y Málaga), considerando factores como la eficiencia estacional, el confort térmico, las emisiones de CO₂ y los costes asociados. Los resultados obtenidos permiten establecer criterios de selección tecnológica en función de las condiciones climáticas, el perfil de uso y el marco normativo, aportando recomendaciones fundamentadas para una climatización residencial más sostenible, eficiente y resiliente.

Palabras Clave

- Bomba de calor
- Micro-cogeneración
- Hidrógeno
- Climatización residencial
- Eficiencia energética
- Emisiones de CO₂
- TRNSYS
- Simulación energética
- Pacto Verde Europeo
- Energías renovables

Abstract

This Final Degree Project presents a comparative analysis between two residential heating technologies: air-to-water heat pumps and micro-cogeneration systems based on hydrogen fuel cells. Within the framework of the energy transition promoted by the European Green Deal, the technical, energy and economic feasibility of both solutions is evaluated when applied to a single-family dwelling, modeled and simulated using the TRNSYS environment. Various representative European climate scenarios (Berlin, Paris, and Málaga) are analyzed, considering seasonal efficiency, thermal comfort, CO₂ emissions, and associated costs. The results provide objective criteria for selecting the most suitable technology depending on climate conditions, usage profiles, and regulatory context, offering well-founded recommendations for a more sustainable, efficient, and resilient residential heating model.

Keywords

- Heat pump
- Micro-cogeneration
- Hydrogen
- Residential heating
- Energy efficiency
- CO₂ emissions
- TRNSYS
- Energy simulation
- European Green Deal
- Renewable energy

Índice

1. Introducción	10
1.1. Antecedentes	10
1.2. Objetivos	11
2. Marco Europeo: Climatización	13
2.1. Situación actual del parque de climatización residencial en la UE	14
2.2. Metas y políticas de la UE	16
2.3. Progreso de la Unión Europea en sus metas climáticas	17
3. Soluciones Tecnológicas para el Green Deal	19
3.1. Bomba de Calor	20
3.1.1. Bomba de calor aire-agua (Aeroterminia aire-agua)	21
3.1.2. Componentes y funcionamiento del sistema	22
3.2. Micro-cogeneración	24
3.2.1. Estado actual de su implementación	25
3.2.2. Componentes y funcionamiento del sistema	26
4. Simulación en TRNSYS	28
4.1. Caso de estudio	28
4.1.1. Descripción de la Vivienda Modelo	28
4.1.2. Composición de la Envolvente Térmica	29

4.1.3.	Perfil de Ocupación y Ganancias Internas	30
4.1.4.	Configuración del Sistema de Climatización	31
4.2.	Modelado de componentes TRNSYS	31
4.3.	Selección de ubicaciones de referencia y caracterización climática	38
4.3.1.	Clasificación climática y normativa	38
4.3.2.	Demanda térmica residencial	40
4.3.3.	Rendimiento estacional de tecnologías	40
4.3.4.	Representatividad climática y extrapolación	42
4.4.	Condiciones de simulación	42
4.5.	Bomba de calor	43
4.5.1.	Modelo Daikin Altherma 3 Bibloc ERLA11DV3	43
4.5.2.	Esquema base y modelado	45
4.6.	Micro-cogeneración	50
4.6.1.	Modelo Viessmann Vitovalor PT2 (E11T)	51
4.6.2.	Esquema base y modelado	52
5.	Resultados	60
5.1.	Verificación del comportamiento térmico del modelo	60
5.2.	Parámetros de confort: PMV y PPD	64
5.2.1.	Cumplimiento del confort	66
5.3.	Costes Iniciales	70
5.3.1.	Málaga (España)	70
5.3.2.	París (Francia)	71

5.3.3. Berlín (Alemania)	72
5.3.4. Síntesis	73
5.4. Evaluación del desempeño energético y ambiental	73
5.4.1. Emisiones de CO ₂	75
5.4.2. Consumo de Energía Primaria	77
5.4.3. Costes Operativos	79
5.4.4. Síntesis	81
5.5. Estimación del periodo de amortización del sistema de micro-cogeneración	83
5.5.1. Hipótesis de partida	84
6. Conclusiones	86
6.1. Principales resultados	87
6.2. Conclusión general	87
6.3. Líneas futuras	87

1 | Introducción

1.1. Antecedentes

La **climatización residencial** representa uno de los mayores retos energéticos de la **transición ecológica en Europa**, dado que los sistemas de calefacción y refrigeración son responsables de aproximadamente el **50 % del consumo energético final** en la región [1]. En este contexto, la Unión Europea ha adoptado una estrategia ambiciosa de descarbonización, articulada en torno al *Pacto Verde Europeo* [2], que establece como meta alcanzar la **neutralidad climática en 2050**. Entre las acciones clave para cumplir este objetivo destaca la **eliminación progresiva de sistemas basados en combustibles fósiles** y el impulso a *tecnologías eficientes* como las **bombas de calor** [3].

Como parte de esta estrategia, se han aprobado medidas regulatorias que **prohíben la financiación de nuevas calderas fósiles a partir de 2025**, y establecen su **retirada total para 2040** [4]. Además, se ha fijado como meta la instalación de al menos **30 millones de bombas de calor adicionales** en la Unión Europea para 2030 [5]. Esta tecnología, que permite aprovechar *fuentes de calor renovables* con **altos coeficientes de rendimiento** [6], se posiciona como una solución prioritaria para reemplazar sistemas convencionales en el ámbito doméstico.

No obstante, la **electrificación masiva** del parque de climatización mediante bombas de calor también acarrea desafíos. Entre ellos destaca la **presión adicional sobre la red eléctrica**, especialmente durante los picos de demanda invernal, cuando la eficiencia de estos sistemas disminuye y su consumo se intensifica [7]. Esta situación genera incertidumbre respecto a la *resiliencia del sistema energético europeo* y pone de relieve la necesidad de explorar soluciones complementarias que permitan **diversificar las fuentes de energía térmica y eléctrica**.

Una de estas alternativas emergentes es la **micro-cogeneración doméstica basada en hidrógeno**, una tecnología *ya consolidada en Japón*. Estos sistemas generan simultáneamente *electricidad y calor* a través de pilas de combustible alimentadas por hidrógeno extraído del gas natural o, potencialmente, de fuentes renovables. Su capacidad para producir electricidad de forma **descentralizada** y abastecer la **demanda de agua caliente sanitaria (ACS) y climatización** aporta **mayor autonomía energética** a los hogares [8]. Esta combinación funcional convierte a la micro-cogeneración en una opción con gran potencial para *complementar*

la transición energética en Europa [9].

Aunque la experiencia japonesa ha demostrado su **viabilidad técnica y económica**, la aplicación de estos sistemas en el contexto europeo sigue siendo **incipiente** y se enfrenta a **incertidumbres regulatorias, tecnológicas y de mercado** [10]. Sin embargo, la integración híbrida de *bombas de calor* con *sistemas de micro-cogeneración de hidrógeno* podría ofrecer **beneficios sinérgicos**: aliviar la carga sobre la red eléctrica, aumentar la eficiencia energética global y garantizar un suministro **estable y sostenible** en el sector residencial europeo [11].

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es **evaluar la viabilidad técnica, energética y económica de la implementación de sistemas de micro-cogeneración residenciales basados en hidrógeno**, con especial énfasis en su aplicabilidad en el contexto europeo como alternativa o complemento a las bombas de calor, dentro del marco de la transición energética promovida por el Pacto Verde Europeo.

Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- **Introducir y contextualizar ambas tecnologías** mediante un capítulo descriptivo que presente sus fundamentos, características técnicas, ventajas y limitaciones, con el fin de facilitar su comprensión y enmarcar el análisis posterior.
- **Analizar comparativamente el comportamiento energético y la eficiencia estacional** de sistemas de bomba de calor aire-agua y micro-cogeneración con pila de combustible, considerando distintos escenarios climáticos.
- **Determinar el impacto económico de cada solución**, evaluando el coste de inversión inicial, los costes operativos anuales (consumo energético), y la rentabilidad global del sistema en términos de ahorro energético y retorno de inversión.
- **Valorar la compatibilidad de la micro-cogeneración con la infraestructura energética europea actual**, así como su potencial de integración futura en redes energéticas híbridas (por ejemplo, redes de hidrógeno verde), en función de las tendencias regulatorias y tecnológicas.
- **Identificar las condiciones óptimas de aplicación de cada sistema**, en función del tipo de clima, perfil de uso energético y contexto económico, con el fin de proporcionar

recomendaciones fundamentadas para una transición eficiente y sostenible en el sector residencial.

Con ello, el trabajo pretende aportar una visión rigurosa, cuantitativa y aplicada sobre el papel que podrían desempeñar tecnologías emergentes como la micro-cogeneración en el camino hacia un modelo energético descarbonizado y resiliente, más allá de las soluciones dominantes como la electrificación directa mediante bombas de calor.

2 | Marco Europeo: Climatización

La **climatización de edificios** —incluyendo calefacción y refrigeración— constituye uno de los desafíos más relevantes en materia **energética y climática** para la Unión Europea. En 2020, los edificios fueron responsables de aproximadamente el **42 % del consumo final de energía** y generaron cerca del **35 % de las emisiones de gases de efecto invernadero** relacionadas con la energía en la UE [12]. La mayor parte de esta energía se destina a la *calefacción de espacios y agua caliente*, que en su mayoría continúa dependiendo de **combustibles fósiles** como el gas natural y el gasóleo.

Ante esta elevada contribución al consumo y a las emisiones, la necesidad de transformar el modelo de climatización europeo se ha convertido en una **prioridad estratégica**. Esta urgencia se refleja en la creación del *European Green Deal*, una de las seis comisiones prioritarias de la Unión Europea, cuyo objetivo es convertir a Europa en el **primer continente climáticamente neutro**, a través de una economía moderna y eficiente en el uso de los recursos [13].

Para cumplir los objetivos del *European Green Deal* —lograr la **neutralidad de carbono para 2050** y reducir la dependencia de combustibles fósiles importados— la UE ha centrado sus esfuerzos en la **descarbonización del sector de la climatización** mediante soluciones tecnológicas eficientes. En este contexto, las **bombas de calor** han emergido como una *tecnología estratégica clave*, gracias a su **alta eficiencia energética** y su capacidad para aprovechar fuentes de *calor ambiental renovable* [14].

Desde 2020, diversas iniciativas europeas —como *Fit for 55* y *REPowerEU*— han intensificado esta transición, promoviendo la **sustitución progresiva de las calderas de gas y gasóleo** por sistemas de bomba de calor en viviendas, edificios públicos y comerciales.

2.1. Situación actual del parque de climatización residencial en la UE

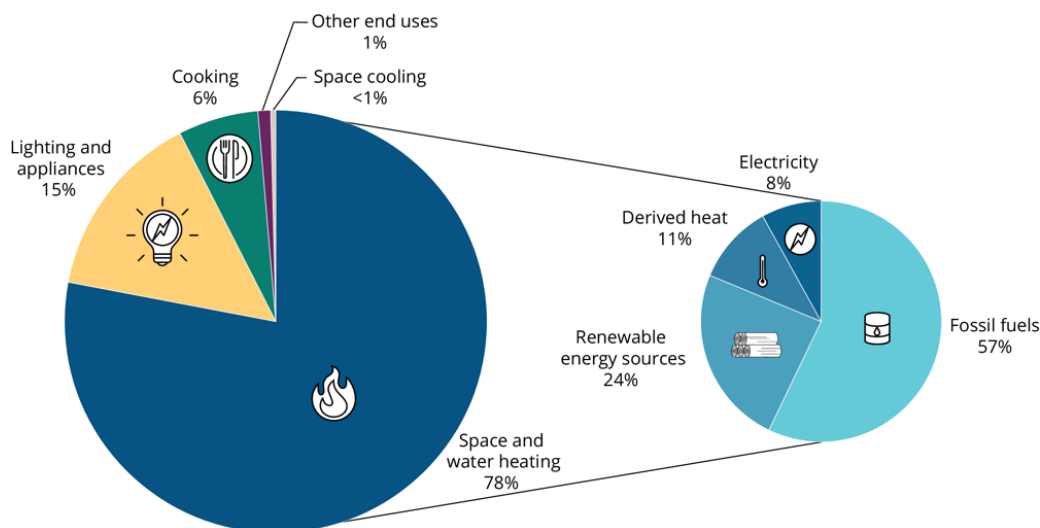


Figura 2.1. Distribución del consumo energético residencial por usos finales y por fuentes energéticas para calefacción en la UE en 2020 (Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente [87]).

En los hogares europeos, aproximadamente el **78 % del consumo energético** se destina a la *calefacción de espacios y al suministro de agua caliente sanitaria (ACS)*, mientras que la cocina representa un 6 %, los electrodomésticos e iluminación un 15 %, y la refrigeración menos del 1 %. Esta distribución puede observarse en la Figura 2.1, que ilustra el desglose energético residencial en la Unión Europea para el año 2020.

A día de hoy, la realidad del parque de climatización residencial en Europa está fuertemente condicionada por la dependencia de **combustibles fósiles**. En 2020, más de la mitad de la energía utilizada para calefacción procedía de *gas natural* (39 %), *derivados del petróleo* (15 %) y aún un 4 % de *carbón* [12]. Las fuentes renovables térmicas y la energía ambiental —como la **aerothermia** y la **geothermia** aprovechadas mediante bombas de calor—, junto con la calefacción urbana y la electricidad, constituían el resto del mix.

Se estima que en la Unión Europea existen actualmente **unos 86 millones de calderas domésticas de combustibles fósiles**, de las cuales aproximadamente 68 millones son de gas y 18 millones de gasóleo. Este dato pone de manifiesto el **enorme reto estructural** que representa la transición hacia un parque tecnológico limpio y descarbonizado en pocas décadas.

A esta dependencia tecnológica se suma un problema de **ineficiencia constructiva**. En

torno al 40 % de los edificios de la UE fueron construidos antes de 1960, y un 90 % antes de 1990, es decir, *previo a la implantación de normativas modernas de eficiencia energética* [15]. Esto implica una gran cantidad de viviendas mal aisladas térmicamente y dotadas de **sistemas de calefacción antiguos y de elevado consumo energético**.

Además, la distribución geográfica del parque de climatización revela **disparidades significativas** dentro de la Unión Europea. Mientras que países del norte y este, como **Suecia** y **Estonia**, han avanzado hacia sistemas más sostenibles, alcanzando en 2023 cuotas del **67,1 %** y **66,7 %** respectivamente de energías renovables en calefacción y refrigeración, gracias al uso extensivo de *biomasa* y *bombas de calor* [16], otros como **Irlanda** y **Países Bajos** presentan cifras considerablemente más bajas, con apenas **7,9 %** y **10,2 %** respectivamente [17]. Esta *heterogeneidad territorial* añade complejidad a la transición energética europea, ya que las políticas deben adaptarse a **contextos nacionales y climáticos muy diversos**.

A ello se suma el hecho de que las **condiciones climáticas** influyen de manera determinante en el perfil de demanda energética residencial. En los países del norte y centro de Europa predomina una *demanda prolongada e intensa de calefacción durante los meses fríos*. Sin embargo, se proyecta que esta demanda disminuirá progresivamente en dichas regiones como efecto del cambio climático, mientras que en los países mediterráneos —donde los inviernos son más suaves— está creciendo de forma constante la *demandas de refrigeración* en verano debido al aumento de las temperaturas y la prolongación de las olas de calor [18].

Este cambio en los patrones de consumo térmico obliga a desarrollar soluciones de climatización que sean tanto **flexibles** como **adaptadas a las condiciones climáticas locales**. Tecnologías como las *bombas de calor reversibles*, capaces de proporcionar tanto calefacción como refrigeración, o los sistemas de *acumulación térmica estacional* representan estrategias eficaces para dar respuesta a estas necesidades emergentes [19].

Por otro lado, la transición hacia tecnologías más limpias debe considerar también su **impacto socioeconómico**. Muchas de las viviendas con sistemas térmicos obsoletos coinciden con hogares en situación de vulnerabilidad energética. Según la Comisión Europea, alrededor del **7 % de la población de la UE** se encuentra en situación de *pobreza energética*, es decir, con dificultades para mantener su hogar a una temperatura adecuada [20]. Cualquier política de sustitución tecnológica debe, por tanto, incorporar **mecanismos de apoyo económico y acompañamiento social** para evitar que esta transición agrave las desigualdades existentes.

2.2. Metas y políticas de la UE

La Comisión Europea lanzó en 2019 el **Pacto Verde Europeo** (*European Green Deal*), que consagra el objetivo legal de alcanzar la **neutralidad climática en 2050**, con una meta intermedia de reducir las emisiones en al menos un **55 % para 2030** [21]. Dentro de este marco, se identificó la renovación energética de edificios como prioridad: la Estrategia *Ola de Renovación* de 2020 apuntó a reformar 35 millones de unidades de edificios para 2030, mejorando el aislamiento e incorporando sistemas de climatización limpios [22]. Las **bombas de calor** figuran explícitamente como tecnología clave para lograr estas metas, al permitir electrificar la calefacción con alta eficiencia y con energías renovables [23].

El paquete legislativo *Fit for 55* (2021) impulsa la climatización sostenible en edificios mediante objetivos como alcanzar un **49 % de energías renovables** en el sector para 2030, reforzar la eficiencia energética (renovación obligatoria de edificios públicos y reducción del consumo), exigir que toda nueva construcción sea de **cero emisiones** desde 2030 (2028 para edificios públicos) y eliminar progresivamente los sistemas de calefacción fósil en los edificios existentes antes de 2040. A partir de 2027, el uso de combustibles fósiles para calefacción estará cubierto por un mercado de carbono específico (ETS2), y se prohibirán subvenciones para calderas fósiles desde 2025. Además, se fomenta el despliegue de redes de calor renovables, el uso de bombas de calor, y se endurecen los requisitos de rendimiento y etiquetado energético de los equipos térmicos [24].

En respuesta a la crisis energética de 2022, la UE lanzó el plan *REPowerEU*, que refuerza y adelanta muchas de estas metas. REPowerEU busca reducir drásticamente la demanda de gas natural ruso mediante renovables y eficiencia; en calefacción, llama a duplicar la tasa de despliegue de bombas de calor en los próximos años. En concreto, la Comisión Europea se fijó el objetivo de instalar al menos **10 millones de bombas de calor adicionales para 2027** (sobre la base de 20 millones existentes en 2022), acelerando así la transición [25].

Por último, en 2023 la UE propuso el *Net-Zero Industry Act*, una iniciativa industrial que identifica a las bombas de calor entre las tecnologías limpias estratégicas cuya manufactura europea se quiere impulsar (objetivo de capacidad doméstica >40 % de la demanda para 2030) [26].

2.3. Progreso de la Unión Europea en sus metas climáticas

Meta 2020: Reducción del 20 % de GEI respecto a 1990

La Unión Europea superó ampliamente el objetivo climático fijado para 2020, que consistía en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 20 % respecto a los niveles de 1990. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, las emisiones netas de la UE-27 se redujeron en un **34 %** en comparación con 1990, superando con holgura la meta establecida [27]. Este cumplimiento confirmó el éxito del paquete de objetivos conocido como *20-20-20*, que también incluía aumentar la cuota de energías renovables y mejorar la eficiencia energética en un 20 % cada uno.

Meta 2030: Reducción del 55 % de GEI respecto a 1990 (neto)

El objetivo climático para 2030 establece una reducción neta del 55 % de las emisiones de GEI con respecto a 1990. Hasta el año 2023, la UE ha logrado una reducción neta estimada en torno al **37 %** [28], lo que representa un progreso considerable. Sin embargo, las proyecciones actuales indican que, bajo las políticas existentes, se alcanzaría una reducción cercana al **49 %** para 2030, dejando una brecha de varios puntos porcentuales respecto al objetivo establecido del 55 % [29]. Por tanto, será necesario acelerar la aplicación de medidas climáticas durante esta década para garantizar el cumplimiento de la meta.

Meta 2050: Neutralidad climática

El objetivo a largo plazo de la UE es alcanzar la **neutralidad climática** para el año 2050, es decir, lograr una reducción neta del 100 % de las emisiones de GEI. Este objetivo está formalizado en la **Ley Europea del Clima (Reglamento UE 2021/1119)** [30], que establece un marco legal vinculante para alcanzar la neutralidad climática. Alcanzar esta meta exigirá mantener una tasa de reducción anual de emisiones del orden del **2,8 %** respecto a los niveles de 1990 hasta 2030 [31], y posteriormente acelerar aún más las reducciones. Esto solo será posible mediante una combinación de innovación tecnológica, inversiones masivas y el fortalecimiento de políticas sectoriales, especialmente en aquellos sectores que aún presentan mayores retrasos en su descarbonización.

Tal como se muestra en la Figura 2.2, la evolución histórica de las emisiones de CO evidencia este descenso sostenido.

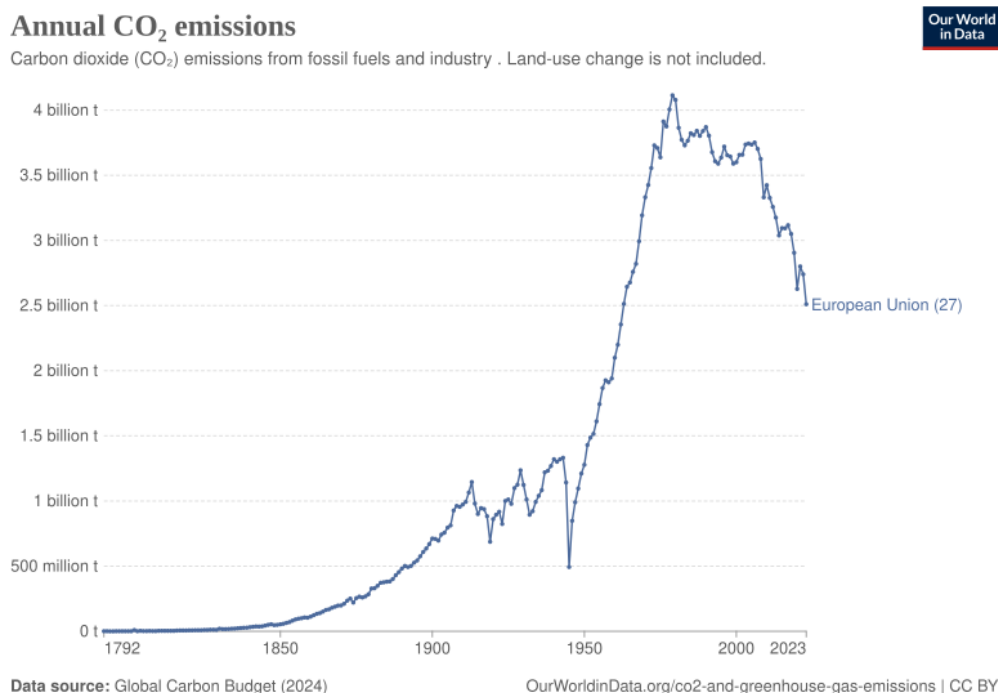


Figura 2.2. Emisiones anuales de CO de la Unión Europea (Fuente: Wikimedia Commons [86]).

En síntesis, la Unión Europea ya ha cumplido sus objetivos climáticos iniciales, como el de 2020, con holgura, y mantiene un progreso firme hacia la meta de 2030, aunque existen riesgos de desaceleración si no se intensifican las medidas.

A nivel agregado, la Unión Europea ha conseguido un hito significativo en su transición hacia la sostenibilidad: el **desacoplamiento entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono**. Entre 1990 y 2023, las emisiones netas de GEI se redujeron en aproximadamente un **37 %**, mientras que el producto interior bruto (PIB) de la UE creció cerca de un **70 %** en el mismo periodo [32]. Este resultado pone de manifiesto que es posible avanzar en la reducción de emisiones sin comprometer el desarrollo económico, gracias a la mejora en la eficiencia energética, la modernización industrial y la adopción de tecnologías más limpias e innovadoras.

3 | Soluciones Tecnológicas a comparar

A lo largo del presente trabajo, la **bomba de calor** se ha presentado de forma reiterada como una de las tecnologías más viables para avanzar en la transición hacia la **descarbonización del sector residencial**. Su elevada *eficiencia energética estacional* (COPs entre 3 y 5 en condiciones óptimas) y su capacidad para aprovechar fuentes térmicas ambientales la posicionan como una herramienta clave en el cumplimiento de los objetivos climáticos del Pacto Verde Europeo [7, 33].

No obstante, resulta esencial no limitar el análisis exclusivamente a esta tecnología. La creciente **complejidad de los sistemas energéticos** europeos y la necesidad de *resiliencia frente a picos de demanda* y fluctuaciones en la generación renovable exigen una visión más amplia. Es preciso contemplar también soluciones emergentes capaces de complementar —o incluso mejorar— el rendimiento global del sistema energético.

En este sentido, tecnologías como la **micro-cogeneración doméstica** merecen una atención especial. Aunque su penetración actual en el mercado europeo es todavía limitada, su *potencial reside en su capacidad de adaptación* a nuevas infraestructuras energéticas, como podría ser el caso de una futura red de distribución de hidrógeno verde [10]. Su funcionamiento basado en pilas de combustible, combinado con la producción simultánea de electricidad y calor útil, aporta ventajas tanto en eficiencia energética como en **autonomía energética residencial**.

La versatilidad de estos sistemas los convierte en candidatos prometedores para contribuir a un *ecosistema energético flexible*, capaz de integrar innovaciones futuras y responder a contextos locales específicos. Por ello, en este capítulo se presentan y analizan en profundidad ambos sistemas —bomba de calor y micro-cogeneración— con el objetivo de evaluar su comportamiento, eficiencia y compatibilidad con las exigencias actuales y futuras.

Este **análisis comparativo** permitirá no solo contrastar sus ventajas y limitaciones, sino también ampliar el abanico de soluciones viables en función de distintos *escenarios de implantación*, disponibilidad tecnológica y evolución de las políticas energéticas europeas.

3.1. Bomba de Calor

Una **bomba de calor** es un sistema termodinámico que transfiere energía térmica desde un entorno de baja temperatura (fuente) hacia otro de mayor temperatura (sumidero), mediante el aporte de trabajo externo. Este proceso se basa en el *ciclo de compresión de vapor*, ampliamente utilizado en aplicaciones de climatización y refrigeración [7].

El principio de funcionamiento se fundamenta en la **segunda ley de la termodinámica**, que establece que el calor no puede fluir espontáneamente de una región fría a una caliente sin la intervención de trabajo externo. Por ello, la bomba de calor emplea un compresor, generalmente accionado eléctricamente, para elevar la presión y temperatura de un fluido refrigerante, permitiendo así la transferencia de calor desde la fuente fría al sumidero caliente [34].

El ciclo termodinámico ideal que describe este proceso es el *ciclo de Carnot inverso*, compuesto por dos procesos isotérmicos y dos adiabáticos, que establece el límite teórico máximo de eficiencia. Sin embargo, en la práctica, las bombas de calor domésticas utilizan el **ciclo de compresión de vapor**, en el cual un refrigerante alterna entre fases líquida y gaseosa, absorbiendo y liberando calor a diferentes presiones [34].

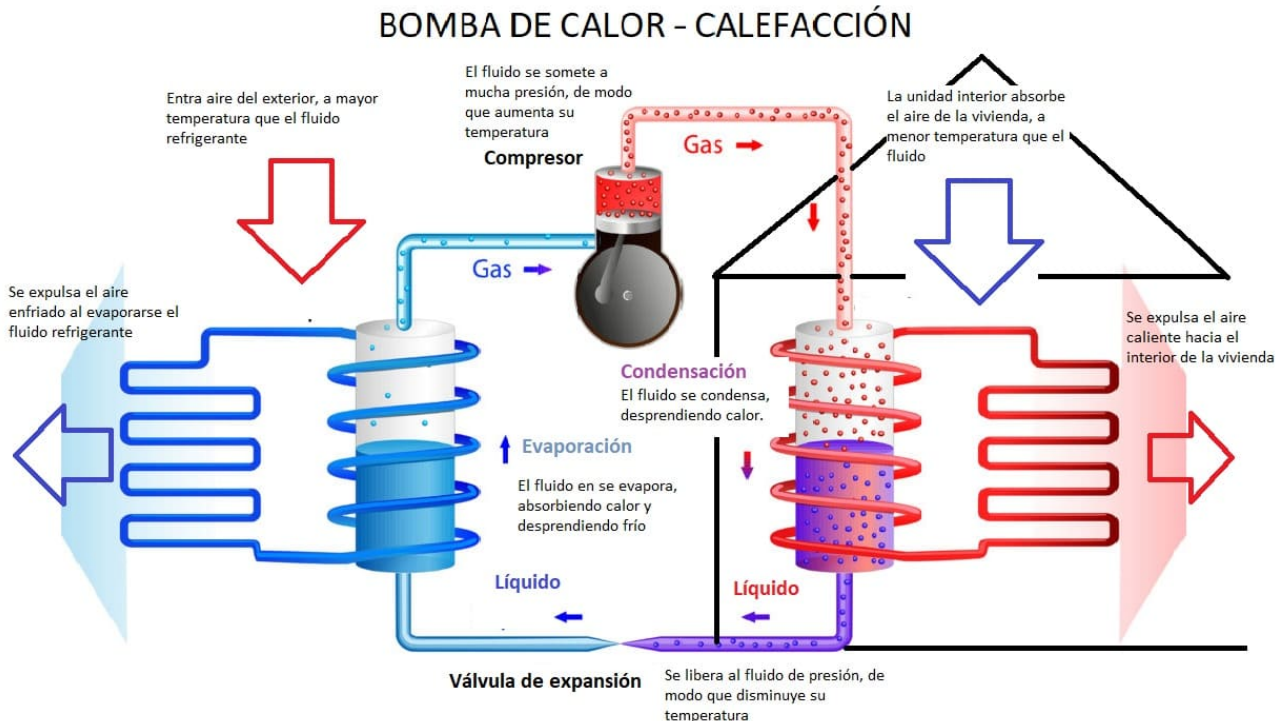


Figura 3.1. Esquema simplificado del funcionamiento de una bomba de calor (Fuente: Área Tecnología [85]).

Tal como se ilustra en la Figura 3.1, el ciclo consta de los siguientes componentes principales:

- **Evaporador:** donde el refrigerante absorbe calor del entorno, evaporándose a baja presión.
- **Compresor:** aumenta la presión y temperatura del refrigerante gaseoso.
- **Condensador:** el refrigerante cede calor al sumidero, condensándose a alta presión.
- **Válvula de expansión:** reduce la presión del refrigerante líquido, completando el ciclo.

Las bombas de calor se clasifican según la fuente de energía térmica y el medio al que entregan el calor. En aplicaciones residenciales, las principales configuraciones son:

- **Aire-aire:** extraen calor del aire exterior y lo transfieren al aire interior.
- **Aire-agua:** captan calor del aire y lo entregan a un sistema de agua caliente para calefacción.
- **Agua-agua:** utilizan fuentes de agua (subterránea o superficial) para intercambiar calor.
- **Geotérmicas:** aprovechan la energía térmica del subsuelo mediante sondas o captadores enterrados [35].

La eficiencia de una bomba de calor se evalúa mediante el **Coefficiente de Rendimiento** (COP), que es la relación entre la energía térmica entregada al sumidero y la energía eléctrica consumida. En condiciones óptimas, las bombas de calor modernas pueden alcanzar COPs entre 3 y 5, lo que implica que por cada unidad de energía eléctrica consumida, se entregan entre 3 y 5 unidades de energía térmica útil [7].

3.1.1. Bomba de calor aire-agua (Aeroterminia aire-agua)

La **bomba de calor aire-agua**, comúnmente conocida como *aeroterminia* en aplicaciones residenciales, extrae energía térmica del aire exterior y la transfiere a un circuito de agua en el interior de la vivienda. Es decir, su fuente fría es el aire ambiente, y el sumidero caliente es el agua que circula por sistemas de climatización como radiadores, suelo radiante o *fan-coils*, así como en acumuladores de agua caliente sanitaria (ACS).

En invierno, opera como bomba de calor para calefacción y/o ACS, y muchos modelos son reversibles, pudiendo proporcionar refrigeración en verano mediante *fan-coils* o suelos refrescantes. Técnicamente, una aerotermia aire-agua consta de una unidad exterior que evapora el refrigerante tomando calor del aire, y una unidad interior (hidráulica) donde el refrigerante condensado libera el calor a un intercambiador agua/refrigerante. De este modo, puede calentar el agua de los circuitos de calefacción a temperaturas típicas de 35–55 °C.

Dado que el rendimiento es mejor con saltos térmicos menores, estos sistemas son especialmente eficientes con suelo radiante o radiadores de baja temperatura, y algo menos eficientes con radiadores convencionales (alta temperatura). Muchos equipos integran también un depósito acumulador para ACS, dado que la producción de agua caliente se realiza de forma gradual.

En cuanto a prestaciones, ofrecen la ventaja de cubrir todas las demandas térmicas del hogar (calefacción, refrigeración y agua caliente) con un solo sistema, utilizando aproximadamente un 75 % de energía del aire y un 25 % de electricidad. Por ello, la legislación los considera energía renovable siempre que su rendimiento estacional SPF exceda cierto umbral. Según la Directiva 2009/28/CE y la Decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013, las bombas de calor accionadas eléctricamente deben tener un SPF superior a 2,5 para ser consideradas como renovables [36].

Las aerotermias aire-agua funcionan todo el año, aunque su eficiencia disminuye en invierno riguroso, requiriendo a veces resistencias de apoyo para alcanzar la temperatura de impulsión deseada. Su instalación implica un coste inicial más alto que sistemas tradicionales, pero proporciona ahorros significativos en la factura energética a lo largo de su vida útil.

3.1.2. Componentes y funcionamiento del sistema

Las bombas de calor domésticas funcionan mayoritariamente mediante un **ciclo de compresión de vapor**, que permite transferir energía térmica desde un entorno frío hacia el interior de la vivienda. Este ciclo está compuesto por cuatro elementos fundamentales conectados en bucle cerrado: **evaporador**, **compresor**, **condensador** y **válvula de expansión**. Un fluido refrigerante recorre este circuito, cambiando de estado (líquido ↔ gas) y transportando calor a lo largo del proceso.

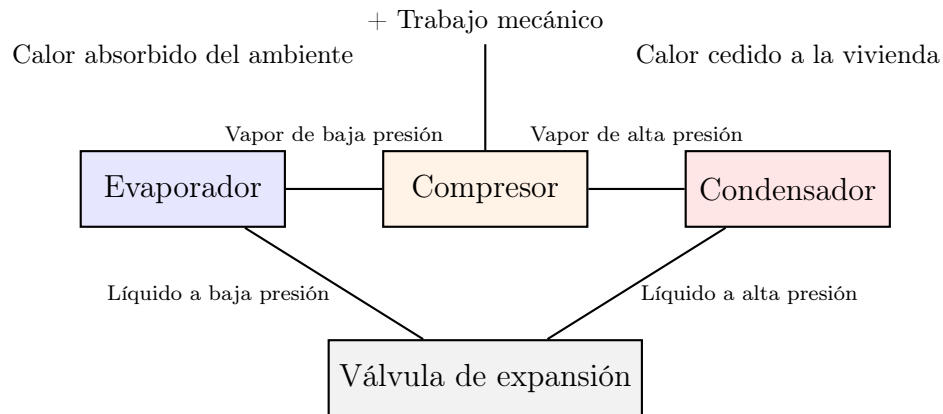


Figura 3.2. Ciclo básico de una bomba de calor por compresión de vapor.

Durante el **modo calefacción**, el ciclo sigue estas etapas:

Evaporador: Es un intercambiador donde el refrigerante líquido a baja presión absorbe calor de la fuente fría (por ejemplo, aire exterior) y se evapora parcial o totalmente. Al evaporarse a baja temperatura, el refrigerante pasa a estado de *vapor frío de baja presión*, extrayendo calor del ambiente frío (que por ello se enfría aún más, como ocurre en el serpentín exterior de un aire acondicionado en invierno). Tras este proceso, el refrigerante sale del evaporador en forma de gas saturado o húmedo (mezcla de gas y líquido) a baja presión.

Compresor: Es un elemento mecánico (accionado eléctricamente) que aspira el vapor frío de baja presión procedente del evaporador y lo comprime, elevando drásticamente su presión y temperatura. Este proceso requiere un aporte de trabajo (consumo eléctrico) significativo. A la salida del compresor, el refrigerante se encuentra en fase gaseosa a alta presión y alta temperatura (*gas sobrecalentado*). El compresor suele ser del tipo alternativo, rotativo o *scroll* en bombas de calor domésticas, y es el principal consumidor de energía del sistema.

Condensador: Es otro intercambiador de calor, situado del lado del foco caliente a calentar (por ejemplo, el interior de la vivienda). El gas refrigerante caliente y presurizado procedente del compresor circula por el condensador cediendo calor al medio que queremos calentar (aire interior, agua de calefacción, etc.). Al perder calor, el refrigerante condensa y pasa a fase líquida, normalmente subenfriada, pero aún a alta presión. En este proceso libera la energía previamente absorbida en el evaporador más la energía añadida por el compresor, calentando así el espacio interior. En una bomba de calor aire-agua, por ejemplo, el condensador transfiere calor al circuito de agua, elevando su temperatura para calefacción/ACS.

Válvula de expansión: Tras condensar, el refrigerante líquido a alta presión atraviesa la válvula de expansión (o válvula de estrangulamiento). Este componente produce una caída

brusca de presión en el fluido al estrangular su paso, lo cual provoca la rápida auto-evaporación parcial del líquido y una gran disminución de su temperatura (efecto Joule-Thomson). A la salida de la válvula, el refrigerante queda en una mezcla de líquido/vapor a baja presión y baja temperatura, listo para ingresar de nuevo al evaporador y reiniciar el ciclo. Este cierre del circuito completa el ciclo termodinámico inverso.

En modo refrigeración, una bomba de calor reversible simplemente invierte el sentido del ciclo mediante una **válvula de conmutación** (válvula de 4 vías), de forma que el evaporador y el condensador intercambian sus roles. Así, durante el verano, el mismo equipo puede funcionar como aire acondicionado: el evaporador pasa a estar en el interior (absorbiendo el calor del ambiente interior) y el condensador en el exterior (rechazando ese calor al aire exterior).

Un parámetro clave para evaluar el desempeño es el **coeficiente de rendimiento** (*COP*, por sus siglas en inglés). En bombas de calor, el COP se define como la relación entre la potencia térmica útil entregada (calor aportado en calefacción o frío extraído en refrigeración) y la potencia eléctrica consumida por el equipo.

Ahora bien, el COP no es fijo: depende de las condiciones de funcionamiento, principalmente de la diferencia de temperatura entre la fuente fría y el foco caliente. Cuanto menor sea el salto térmico que debe vencer la bomba de calor, más alto será su COP (mejor eficiencia). Por ello, las bombas de calor logran COP mayores cuando el exterior no es extremadamente frío y cuando calientan a temperaturas moderadas (por ejemplo, suelo radiante a 35 °C en lugar de radiadores a 60 °C).

Cabe destacar que en modo refrigeración se emplea otro indicador: el **EER** (*Energy Efficiency Ratio*), análogo al COP pero referido a la eficiencia frigorífica

3.2. Micro-cogeneración

La **micro-cogeneración doméstica**, también conocida como *generación distribuida residencial*, es una tecnología que permite generar simultáneamente **electricidad** y **calor útil** en el propio lugar de consumo, mejorando la eficiencia energética global del sistema respecto a las soluciones convencionales separadas.

En este trabajo se analiza una configuración basada en **pila de combustible** (fuel cell), como la implementada en el sistema japonés ENE-FARM. En este esquema, el **hidrógeno** se obtiene mediante un proceso de *reformado con vapor* a partir del **gas natural** de la red domiciliaria. Este reformador descompone el metano (CH_4) en presencia de vapor de agua para

producir una mezcla rica en H_2 , que se purifica para alimentar la pila de combustible.

En la pila de combustible, el H_2 reacciona electroquímicamente con el oxígeno del aire, generando **electricidad en corriente continua (DC)** y **calor residual**. Esta electricidad se convierte posteriormente en **corriente alterna (AC)** mediante un inversor, para su uso en la vivienda. El calor generado, que representa aproximadamente un 50–60 % de la energía total [37], se recupera mediante un intercambiador y se destina a cubrir la demanda de **agua caliente sanitaria (ACS)** y calefacción por circuito hidráulico.

Tal como se muestra en la Figura 3.3, estos sistemas constan de tres bloques principales: el reformador, la pila de combustible y el módulo de recuperación térmica. Su rendimiento eléctrico suele situarse entre el 30–40 %, mientras que el rendimiento térmico adicional eleva la eficiencia global a más del 90 % bajo condiciones óptimas [38].

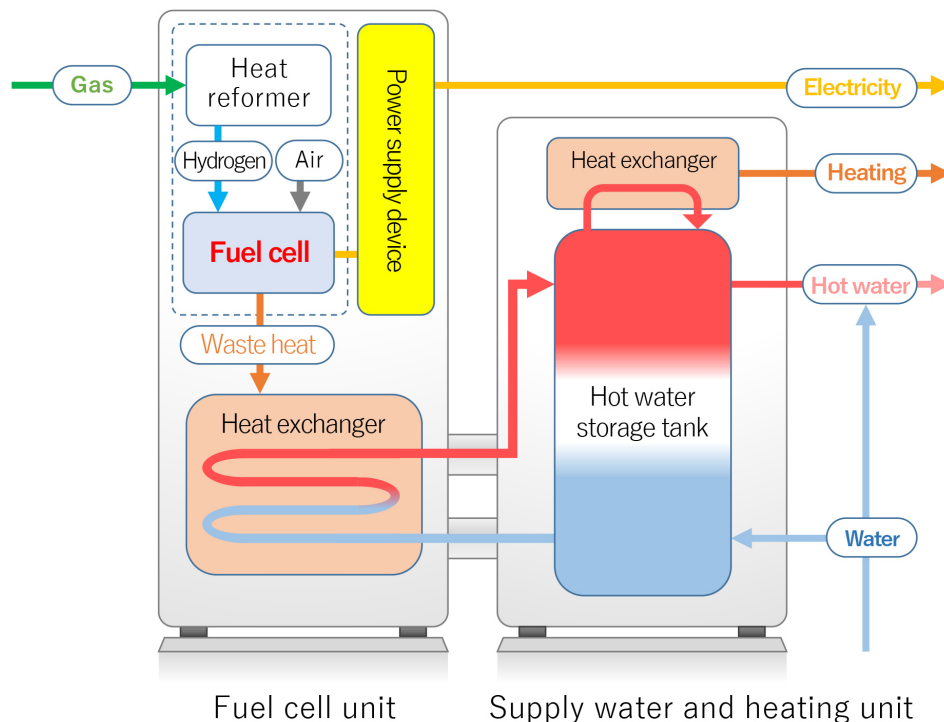


Figura 3.3. Esquema funcional de un sistema de micro-cogeneración doméstica con pila de combustible (Fuente: Krosaki Harima Corporation [75]).

3.2.1. Estado actual de su implementación

Japón se ha consolidado como líder mundial en la adopción de sistemas de micro-cogeneración doméstica basados en pilas de combustible. El programa *ENE-FARM*, lanzado comercialmente

en 2009, ha experimentado un crecimiento sostenido gracias al respaldo de políticas públicas ambiciosas, subvenciones estatales y el compromiso de empresas energéticas como Tokyo Gas o Panasonic [39].

Los sistemas residenciales típicos tienen una potencia eléctrica de salida entre 0,3 kW y 1 kW, suficiente para cubrir entre el 40 % y el 60 % del consumo eléctrico anual de un hogar japonés medio. En paralelo, se generan entre 1 y 2 kW térmicos de calor residual, utilizados para calefacción y agua caliente sanitaria (ACS), lo cual permite alcanzar eficiencias energéticas globales superiores al 90 % en condiciones óptimas de operación [40].

En Europa, la implementación de estas tecnologías sigue en fase inicial. Iniciativas como *ene.field* y *PACE* han permitido instalar más de 10.000 unidades, sobre todo en Alemania, a través de programas como el KfW-433. Empresas como Viessmann, en colaboración con Panasonic, han adaptado modelos *ENE-FARM* al contexto europeo. No obstante, la expansión ha sido limitada por obstáculos como el elevado coste de inversión, la escasa infraestructura de mantenimiento y unas políticas energéticas que priorizan la electrificación directa frente al uso de gases [41].

Pese a ello, se prevé que hacia 2030 estas barreras puedan mitigarse si se promueve el hidrógeno verde como fuente energética para sectores residenciales, especialmente en países como Reino Unido, Italia o Francia, donde ya se han realizado experiencias piloto prometedoras.

3.2.2. Componentes y funcionamiento del sistema

Un sistema doméstico de micro-cogeneración basado en pila de combustible consta de los siguientes elementos principales:

- **Pila de combustible (stack):** Es el núcleo del sistema donde se produce la reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno. Las tecnologías más comunes son las pilas de membrana de intercambio protónico (PEMFC), que operan a temperaturas de 60–80 °C con tiempos de arranque rápidos, y las pilas de óxido sólido (SOFC), que funcionan a temperaturas más altas (600–850 °C) y permiten una mayor eficiencia eléctrica, aunque con tiempos de arranque más largos [42, 40].
- **Reformador de gas:** Convierte el gas natural en una corriente rica en hidrógeno mediante procesos como el reformado con vapor. Este proceso es esencial para las PEMFC, que requieren hidrógeno de alta pureza, mientras que las SOFC pueden tolerar mezclas de gases con monóxido de carbono y otros hidrocarburos [42, 40].

- **Unidad de potencia y control:** Incluye el inversor DC-AC, sistemas de control electrónico y de gestión energética que optimizan la operación del sistema, ajustando la producción eléctrica y térmica según la demanda del hogar.
- **Sistema de gestión térmica:** Compuesto por intercambiadores de calor y bombas que transfieren el calor generado en la pila al tanque de agua caliente. Típicamente, se incorpora un tanque de almacenamiento térmico de unos 200 litros a aproximadamente 65 °C. Si la demanda excede la capacidad de la pila, un quemador auxiliar integrado puede calentar adicionalmente el agua, garantizando un suministro continuo [40].
- **Conexiones a la vivienda:** Salidas eléctricas conectadas al cuadro eléctrico doméstico y circuitos de agua caliente conectados a grifos, duchas, calefacción por suelo radiante, etc. Algunos modelos incluyen funciones inteligentes (IoT) para monitorear la producción y el consumo, y para el control remoto del sistema.

Estos componentes están estrechamente interconectados, formando un sistema integrado cuyo diseño responde a las necesidades térmicas y eléctricas del hogar moderno. La pila de combustible actúa como el generador primario de energía, mientras que el reformador asegura el suministro constante de hidrógeno, esencial para su funcionamiento. El sistema de control coordina estos subsistemas para maximizar la eficiencia, equilibrando la producción energética con el patrón de consumo doméstico. La gestión térmica permite aprovechar el calor residual, convirtiéndolo en un recurso útil para agua caliente sanitaria o calefacción, adaptándose así a las distintas demandas del hogar. Esta sinergia convierte a la micro-cogeneración en una solución tecnológica versátil y eficiente, capaz de cubrir simultáneamente múltiples servicios energéticos con una sola unidad compacta y automatizada, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y autosuficiencia energética residencial.

4 | Simulación en TRNSYS

La modelización computacional de sistemas energéticos se ha consolidado como una herramienta poderosa y fiable para la obtención de resultados técnicos rigurosos. Esta metodología permite predecir, con un grado razonable de precisión, el comportamiento de un sistema bajo diferentes escenarios de operación, facilitando la toma de decisiones informadas en etapas de diseño, planificación o mejora energética.

Para llevar a cabo las simulaciones necesarias en el presente trabajo, se empleará el software TRNSYS 17, una plataforma especializada en la simulación dinámica de sistemas térmicos y de climatización. TRNSYS se caracteriza por su flexibilidad y robustez, permitiendo la construcción modular de sistemas complejos mediante bloques o componentes individuales que pueden interconectarse para representar tanto equipos como condiciones de operación.

Dado que el objetivo principal de este estudio es comparar el rendimiento de dos sistemas distintos de climatización, se procederá a construir cada uno de ellos de forma independiente dentro del entorno de simulación. Asimismo, será necesario modelar una vivienda tipo, que actuará como escenario común para la aplicación de ambas soluciones. Esta vivienda servirá como base sobre la cual se analizará el comportamiento térmico y energético de cada sistema en condiciones comparables.

Este enfoque permitirá evaluar el desempeño de ambos sistemas de manera individual, bajo distintas condiciones climáticas y de operación. A partir de los resultados obtenidos, se podrá establecer una comparación técnica que justifique la recomendación de uno u otro sistema en función de los requerimientos específicos del entorno simulado.

4.1. Caso de estudio

4.1.1. Descripción de la Vivienda Modelo

La vivienda utilizada como base para la simulación es un modelo unifamiliar que presenta una configuración térmica zonificada. Se han definido cinco zonas climatizadas —salón, cocina, oficina, dormitorio de padres y dormitorio de niños— mientras que el resto del espacio se ha modelado como una única zona no acondicionada. La superficie total acondicionada asciende a

121 m², distribuida según se detalla en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Superficie de las zonas climatizadas

Zona	Superficie (m ²)
Salón	38.7
Cocina	21.1
Dormitorio Padres	18.6
Dormitorio Niños	18.6
Oficina	24.0

La distribución espacial de estas zonas y su orientación respecto a los puntos cardinales se representa en la Figura 4.1, donde se muestran tanto la planta arquitectónica como una vista tridimensional esquemática del modelo implementado.

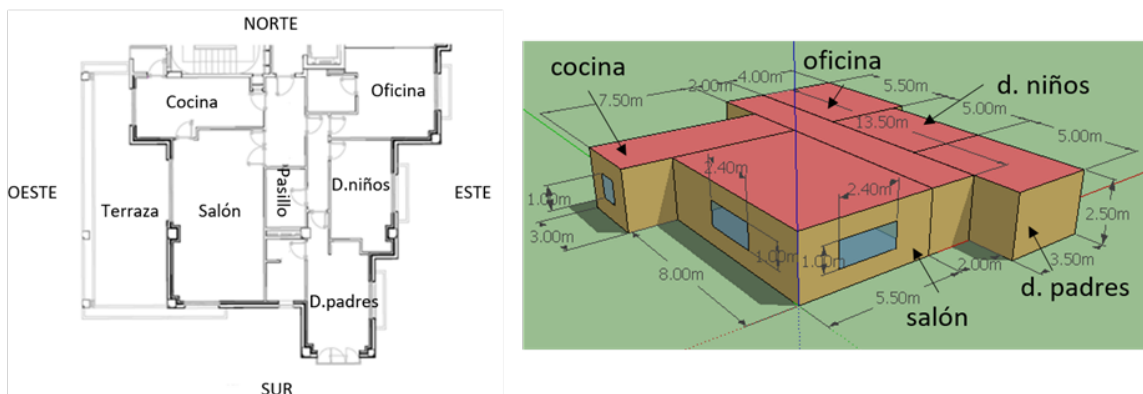


Figura 4.1. Planta y vista 3D de la vivienda utilizada en la simulación

4.1.2. Composición de la Envolvente Térmica

La envolvente térmica del edificio ha sido definida en detalle a partir de la estratificación de materiales reales, lo que permite una simulación precisa del comportamiento energético. La Tabla 4.2 resume la composición de los elementos constructivos principales:

Tabla 4.2. Composición de los elementos constructivos

Elemento	Composición
Pared exterior	Yeso (1.5 cm) / Ladrillo (9 cm) / Aire / Lana de roca (4 cm) / Ladrillo (12 cm) / Mortero de cemento (1.5 cm)
Pared interior	Yeso (1.5 cm) / Ladrillo (7 cm) / Yeso (1.5 cm)
Techo / Suelo	Pavimento (5 cm) / Hormigón (31 cm) / Pavimento (5 cm)
Ventana	Vidrio (4 mm) / Aire (6 mm) / Vidrio (4 mm)

Las propiedades termofísicas de cada capa de material están recogidas en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Propiedades termofísicas de los materiales

Material	Conductividad (W/m·K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)
Ladrillo 12 cm	0.76	1600	1135
Ladrillo 9 cm	0.49	1200	800
Ladrillo 7 cm	0.49	1200	800
Cemento (Hormigón) 31 cm	1.54	1168	1050
Yeso	0.30	800	920
Lana de roca	0.042	30	840
Pavimento	1.10	2000	1380
Mortero de cemento	1.40	2000	1050

4.1.3. Perfil de Ocupación y Ganancias Internas

Dado que se ha optado por un sistema de climatización zonificado, es fundamental establecer los perfiles de uso específicos para cada estancia. En la Tabla 4.4 se representan las ganancias internas por ocupación (O), iluminación (I) y equipos (E) en función de la hora del día y la zona.

Tabla 4.4. Perfil horario de ocupación y cargas internas [Ocupación/Iluminación/Equipos]

Hora	Salón	Cocina	Oficina	Dorm. Niños	Dorm. Padres
0:00–7:00	0/0/0	0/0/300	0/0/0	2/0/0	2/0/0
7:00–7:30	0/0/0	1/5/300	0/0/0	2/0/0	1/0/0
7:30–8:00	0/0/0	1/5/770	0/0/0	1/5/0	1/0/0
8:00–10:00	1/5/100	1/5/770	0/0/0	1/5/0	0/0/0
10:00–16:00	1/0/100	1/0/300	0/0/0	1/0/250	0/0/0
16:00–17:00	2/0/100	1/0/300	0/0/0	0/0/0	0/0/0
17:00–19:00	1/5/100	1/5/300	1/5/250	0/0/0	0/0/0
19:00–20:00	1/5/100	1/5/300	0/0/0	0/0/0	0/0/0
20:00–20:30	3/5/100	1/5/770	0/0/0	0/0/0	0/0/0
20:30–23:00	4/5/100	0/0/300	0/0/0	0/0/0	0/0/0
23:00–24:00	0/0/0	0/0/300	0/0/0	2/0/0	2/5/0

Nota: El grado de actividad según ISO 7730 es: (1) Sentado trabajo muy ligero, 120 W; (2) Sentado reposo, 100 W; (3) De pie trabajo ligero, 185 W.

4.1.4. Configuración del Sistema de Climatización

El sistema de climatización modelado es de tipo hidrónico, compuesto por los siguientes elementos:

- Unidad de producción térmica (según el escenario: bomba de calor o micro-cogeneración)
- Red de distribución de agua caliente
- Unidades terminales: suelos radiantes
- Sistema de control: centralizado

4.2. Modelado de componentes TRNSYS

Para representar con precisión el comportamiento del sistema térmico de la vivienda, se ha implementado un modelo modular en TRNSYS 17, basado en una arquitectura de componentes

denominados *Types*. Cada *Type* reproduce el comportamiento físico o lógico de un elemento real, permitiendo construir una simulación detallada y dinámica del sistema de climatización.

A continuación, se describen los principales *Types* empleados en el caso de estudio:

- **Type56 – Edificio multizona:** Componente central del modelado, representa la envolvente térmica de la vivienda y su comportamiento dinámico. Permite definir zonas térmicas, superficies (paredes, ventanas, suelos, techos), materiales con sus propiedades termo-físicas, condiciones de contorno, ganancias internas, y perfil de ocupación. Se ha importado el modelo 3D desde SketchUp, permitiendo una mayor precisión geométrica.



Figura 4.2. Type56

- **Type15–TMY3 – Datos meteorológicos:** Este componente permite la lectura de ficheros climáticos en formato TMY3 (Typical Meteorological Year), los cuales contienen información horaria de radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, entre otras variables.

El *Type15* actúa como fuente de condiciones de contorno para el modelo, proporcionando a los componentes dependientes del clima (como el *Type56*, *Type941* o *Type653*) los datos necesarios para el cálculo de intercambios térmicos con el entorno. Es fundamental para garantizar una simulación representativa y ajustada a la realidad estacional del emplazamiento.



Figura 4.3. Type15–TMY3

- **Type941 – Bomba de calor aire-agua:**

Este componente simula una bomba de calor aire-agua de una etapa, modelada a partir de datos reales proporcionados por el fabricante en formato de archivos de catálogo. Se emplea habitualmente para representar dispositivos de climatización residencial que transfieren energía térmica entre un flujo de aire exterior (fuente) y un circuito hidráulico (sumidero), ya sea en modo calefacción o refrigeración.

A diferencia de modelos más detallados como el Type917, el Type941 prescinde de los efectos de humedad sobre el aire de entrada, lo cual simplifica su configuración sin comprometer su fidelidad cuando el lado de aire está expuesto directamente al ambiente exterior.

- **Entradas necesarias:** temperatura del aire exterior, temperatura del agua de entrada, caudales máscicos del aire y del líquido, y señales de control (encendido, modo calefacción/refrigeración, uso del desesupercalentador y resistencia auxiliar).
- **Ficheros de rendimiento:** el componente se alimenta de dos archivos en formato `.dat` que contienen el rendimiento normalizado (capacidad y consumo eléctrico) tanto en modo calefacción como refrigeración. Estos datos se interpolan linealmente en función de las condiciones de operación, pero nunca se extrapolan fuera del rango definido.
- **Escalabilidad:** dado que los archivos de rendimiento están normalizados respecto a condiciones nominales, el modelo permite simular bombas de diferentes tamaños simplemente ajustando los parámetros de capacidad y potencia nominales.
- **Modos de operación:** calefacción activa, refrigeración activa, solo ventilador, y uso exclusivo de resistencia auxiliar. En todos los casos, la potencia térmica intercambiada y la temperatura de salida del fluido son calculadas dinámicamente.
- **Salida de resultados:** temperatura de salida del fluido, potencia térmica entregada, potencia eléctrica consumida, coeficiente de rendimiento (COP) y energía auxiliar empleada si la capacidad de la bomba no es suficiente.

Este modelo no está basado en principios termodinámicos fundamentales, sino en el ajuste de datos experimentales, lo que lo hace especialmente útil para representar bombas de calor reales comercialmente disponibles. Es fundamental para evaluar con precisión el comportamiento de la bomba de calor en distintas condiciones climáticas y perfiles de carga, como los que se analizan en este trabajo.



Figura 4.4. Type941

El comportamiento del componente Type941 se basa en la interpolación de datos de catálogo normalizados, complementado con un conjunto de ecuaciones energéticas y termodinámicas que permiten calcular las variables clave del sistema. A continuación se detallan las principales ecuaciones empleadas durante la simulación:

Cálculo de la energía útil transferida al circuito de ACS (desesupercalentador):

$$q_{\text{dhw}} = UA_{\text{des}} \cdot (T_{\text{ref}} - T_{\text{in,dhw}}) \quad (4.1)$$

$$T_{\text{out,dhw}} = T_{\text{in,dhw}} + \frac{q_{\text{dhw}}}{\dot{m}_{\text{dhw}} \cdot c_{p,\text{dhw}}} \quad (4.2)$$

Balance de energía del sistema (modo calefacción):

$$q_{\text{cond}} = q_{\text{cap}} - q_{\text{dhw}} \quad (4.3)$$

$$q_{\text{evap}} = q_{\text{cond}} + p_{\text{comp}} + p_{\text{ctrl}} + p_{\text{blower}} \quad (4.4)$$

Temperatura de salida del fluido (primario):

$$T_{\text{out,liq}} = T_{\text{in,liq}} + \frac{q_{\text{cond}} + q_{\text{aux}}}{\dot{m}_{\text{liq}} \cdot c_{p,\text{liq}}} \quad (4.5)$$

Coficiente de rendimiento (COP):

$$COP = \frac{q_{\text{cond}} + q_{\text{aux}}}{p_{\text{comp}} + p_{\text{ctrl}} + p_{\text{blower}}} \quad (4.6)$$

En modo refrigeración:

$$q_{\text{cond}} = q_{\text{cap}} + q_{\text{dhw}} \quad (4.7)$$

$$q_{\text{evap}} = q_{\text{cap}} \quad (4.8)$$

Potencia térmica del aire (flujo de calor hacia/desde el aire):

$$q_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot (h_{\text{out,air}} - h_{\text{in,air}}) \quad (4.9)$$

$$q_{\text{air,sens}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}} \cdot (T_{\text{out,air}} - T_{\text{in,air}}) \quad (4.10)$$

$$q_{\text{air,lat}} = q_{\text{air}} - q_{\text{air,sens}} \quad (4.11)$$

En caso de uso exclusivo del sistema auxiliar:

$$T_{\text{out,liq}} = T_{\text{in,liq}} + \frac{q_{\text{aux}}}{\dot{m}_{\text{liq}} \cdot c_{p,\text{liq}}} \quad (4.12)$$

Relación con el EER (modo refrigeración):

$$EER = COP \cdot 3,414 \quad (4.13)$$

Donde:

- q_{cond} : calor entregado al fluido (condensador)
 - q_{cap} : capacidad térmica total del ciclo
 - q_{dhw} : calor transferido al ACS (desesupercalentador)
 - q_{aux} : potencia auxiliar aportada al fluido
 - $p_{\text{comp}}, p_{\text{ctrl}}, p_{\text{blower}}$: potencias eléctricas consumidas por el compresor, control y ventilador
 - COP, EER : coeficientes de rendimiento en modo calefacción y refrigeración
 - \dot{m} : caudal másico (subíndices: air, liq, dhw)
 - T : temperatura en puntos de entrada/salida
 - c_p, h : calor específico y entalpía
- **Type4a – Tanque de acumulación:** Modela un volumen de almacenamiento térmico (agua caliente) de capacidad configurable. Resuelve la ecuación de balance de energía con entradas y salidas de caudal, permitiendo simular la inercia térmica del sistema y su capacidad de satisfacer demandas de ACS y calefacción.



Figura 4.5. Type4a

- **Type114 – Bomba de impulsión de agua:** Simula una bomba hidráulica con caudal fijo o regulable. Se utiliza para mantener constante el caudal de circulación en el circuito hidráulico. En el modelo, esta bomba impulsa el fluido térmico desde la bomba de calor hacia las unidades terminales (radiadores o suelo radiante).

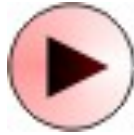


Figura 4.6. Type114

- **Type11 (f, h, b) – Válvulas hidráulicas:** Estas subvariantes del Type11 representan distintos tipos de válvulas hidráulicas utilizadas para controlar o redirigir el caudal en el sistema de distribución térmica. Cada una tiene un comportamiento específico:
 - Type11f: válvula divergente para redirigir el flujo hacia diferentes ramales (calefacción o ACS).



Figura 4.7. Type11f – Válvula divergente

- Type11h: válvula convergente para fusionar caudales procedentes de distintos ramales.



Figura 4.8. Type11h – Válvula convergente

- Type11b: válvula de control proporcional, utilizada para regular el paso de fluido en función de una variable de consigna (por ejemplo, la temperatura de retorno).



Figura 4.9. Type11b – Válvula de control proporcional

- **Type14e/h – Perfiles horarios:** Estos componentes permiten introducir señales de control temporizadas. En el modelo se utilizan para establecer la consigna de temperatura (por ejemplo, 20 °C para calefacción), el encendido/apagado de la bomba de calor y el perfil de demanda de ACS.

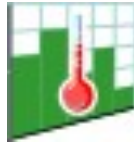


Figura 4.10. Type14e

- **Type653 – Emisor de suelo radiante:** Simula el intercambio de calor entre el fluido térmico que circula por un sistema de suelo radiante y las zonas climatizadas. Calcula el flujo térmico transmitido en función del caudal, temperatura de entrada y condiciones térmicas de la estancia. Este componente se emplea como alternativa o mejora en algunos escenarios frente a radiadores.



Figura 4.11. Type653

- **Type65 – Monitor de resultados (Scope):** Utilizado para visualizar y registrar variables clave durante la simulación, como temperaturas, potencias térmicas, consumos eléctricos, etc. Permite exportar los resultados para su posterior tratamiento y análisis cuantitativo.



Figura 4.12. Type65

Durante el resto del día, la demanda se considera nula o residual. El caudal horario de consumo se expresa en forma de señal unitaria y es utilizado por el modelo para activar el intercambiador de calor con el tanque acumulador (modelado con **Type4a**). La temperatura objetivo del ACS se ha fijado en 45 °C, conforme a los valores recomendados para uso doméstico y eficiencia energética.

Este perfil simula una demanda típica de una vivienda ocupada por una familia estándar, y permite evaluar el comportamiento del sistema de producción en términos de capacidad de cobertura, estabilidad térmica del acumulador y consumo energético asociado.

Objetivo del Modelo

Este modelo de vivienda sirve como escenario base para realizar la comparación entre distintas tecnologías de climatización, garantizando una igualdad de condiciones en términos de demanda térmica, configuración constructiva y control operativo. A través de él se evaluará el desempeño energético, la eficiencia estacional, el confort térmico proporcionado y la viabilidad económica de cada sistema simulado.

4.3. Selección de ubicaciones de referencia y caracterización climática

La simulación energética de sistemas de climatización residencial a escala europea requiere una selección representativa de climas. En este trabajo se justifican, desde un punto de vista técnico y geográfico, las ciudades de Berlín (Alemania), París (Francia) y Málaga (España) como ubicaciones clave para el análisis de tecnologías como bombas de calor y micro-cogeneración. La selección se basa en la clasificación climática de Köppen, normativa térmica (CTE y TRY), perfiles de demanda energética y cobertura estratégica de la diversidad climática europea.

4.3.1. Clasificación climática y normativa

La clasificación climática de Köppen-Geiger es uno de los sistemas más utilizados a nivel internacional para categorizar los distintos tipos de clima terrestre. Fue desarrollada originalmente por Wladimir Köppen y revisada posteriormente por Rudolf Geiger, combinando criterios de temperatura y precipitación a lo largo del año. Su propósito es reflejar las condiciones climáticas que influyen en la vegetación natural, el uso del suelo y, por extensión, en la demanda energética de los edificios.

El sistema se basa en una codificación alfanumérica de tres letras:

- **Primera letra (grupo principal):** define el tipo climático general según las temperaturas medias.
 - **A** – Tropical: todos los meses con temperatura media $> 18^{\circ}\text{C}$.
 - **B** – Árido: evaporación supera a la precipitación.

- **C** – Templado (mes más frío entre -3°C y 18°C).
 - **D** – Continental (mes más frío $< -3^{\circ}\text{C}$, y al menos un mes $> 10^{\circ}\text{C}$).
 - **E** – Polar (mes más cálido $< 10^{\circ}\text{C}$).
- **Segunda letra (precipitaciones)**: describe la distribución estacional de la lluvia.
 - **f** – Húmedo todo el año (sin estación seca).
 - **s** – Verano seco (precipitaciones estivales muy bajas).
 - **w** – Invierno seco.
 - **Tercera letra (temperatura)**: caracteriza la severidad del verano o del invierno.
 - **a** – Verano caluroso ($T_{\text{mes más cálido}} > 22^{\circ}\text{C}$).
 - **b** – Verano templado (al menos cuatro meses $> 10^{\circ}\text{C}$, pero ninguno $> 22^{\circ}\text{C}$).
 - **c** – Verano fresco (uno a tres meses $> 10^{\circ}\text{C}$).

Este sistema permite identificar de forma precisa los patrones climáticos dominantes en una región y resulta especialmente útil en estudios energéticos, ya que permite comparar la demanda térmica en función del clima. Por ejemplo:

- **Csa** – Clima mediterráneo con verano caluroso: típico de la cuenca mediterránea (ej. Málaga).
- **Cfb** – Clima oceánico templado: frecuente en Europa occidental (ej. París).
- **Dfb** – Clima continental húmedo con verano templado: característico del centro y norte de Europa (ej. Berlín).

La versión actualizada del mapa de Köppen-Geiger se ha digitalizado con resolución global de 1 km^2 y se encuentra disponible en Peel et al. (2007) [64].

Berlín — Clima continental húmedo (Dfb)

Berlín presenta un clima Dfb según Köppen, con inviernos fríos (media de enero $\approx 0.8^{\circ}\text{C}$) y veranos templados (julio $\approx 19.3^{\circ}\text{C}$) [53]. En términos normativos, Alemania utiliza archivos TRY (Test Reference Year) para simulaciones energéticas normalizadas, disponibles a través del Deutscher Wetterdienst (DWD) [54].

Málaga — Clima mediterráneo cálido (Csa)

Málaga tiene un clima subtropical mediterráneo Csa según Köppen, con inviernos suaves (enero $\approx 12^\circ\text{C}$) y veranos cálidos (agosto $\approx 25^\circ\text{C}$) [55]. Según el Código Técnico de la Edificación, Málaga pertenece a la zona climática A3, caracterizada por muy baja severidad de calefacción y alta de refrigeración [56].

París — Clima oceánico templado (Cfb)

París se clasifica como Cfb en la escala Köppen, con temperaturas moderadas todo el año y precipitación relativamente uniforme (media anual ≈ 720 mm) [57]. Representa el clima oceánico típico de Europa occidental.

4.3.2. Demanda térmica residencial

La diversidad de perfiles de demanda térmica es evidente al comparar los grados-día de calefacción (HDD) y refrigeración (CDD):

- **Berlín:** ≈ 3000 HDD; CDD <100 [58].
- **París:** 2200–2500 HDD; ≈ 100 CDD.
- **Málaga:** 600–1000 HDD; 700–800 CDD [56].

Esta distribución refleja climas calefacción-dominantes (Berlín), balanceados (París) y refrigeración-dominantes (Málaga), lo cual es esencial para evaluar tecnologías de climatización en diferentes condiciones.

4.3.3. Rendimiento estacional de tecnologías

El coeficiente de rendimiento estacional, o **SCOP** (del inglés *Seasonal Coefficient of Performance*), es un parámetro que cuantifica la eficiencia energética global de una bomba de calor en modo calefacción a lo largo de toda la temporada de uso. A diferencia del **COP** convencional, que representa el rendimiento en condiciones puntuales (por ejemplo, a $+7^\circ\text{C}$ exterior), el SCOP pondera distintos puntos de funcionamiento, cargas parciales y temperaturas exteriores representativas de un perfil climático estacional.

$$\text{SCOP} = \frac{\text{Energía térmica útil suministrada (kWh)}}{\text{Energía eléctrica consumida (kWh)}} \quad (4.14)$$

Este valor se determina conforme a la norma europea **EN 14825**, que establece tres perfiles climáticos estandarizados:

- **Clima frío** (ej. Helsinki)
- **Clima medio** (ej. Estrasburgo)
- **Clima cálido** (ej. Atenas)

El SCOP es fundamental para:

- Comparar la eficiencia estacional de distintas bombas de calor.
- Calcular el ahorro energético anual estimado en una instalación.
- Determinar la clasificación energética según el etiquetado europeo (*Ecodesign* y *Energy Labelling*, Reglamento UE 813/2013).

Valores típicos de SCOP pueden variar entre 2.5 y 4.5 según el clima y la calidad del equipo. Por ejemplo, una bomba de calor con $\text{SCOP} = 4$ en clima templado entrega, en promedio, 4 kWh de energía térmica por cada 1 kWh de electricidad consumida durante la temporada de calefacción.

Bombas de calor

El coeficiente de rendimiento estacional (SCOP) de las bombas de calor varía según el clima. Según la norma EN 14825, se definen perfiles de ensayo para climas “más frío”, “medio” y “más cálido” [59]. Berlín representa el clima frío, donde el SCOP disminuye debido a temperaturas exteriores negativas frecuentes [60]; Málaga, por el contrario, permite rendimientos óptimos con $\text{SCOP} > 4$ gracias a su invierno suave [61]; París actúa como referencia del clima medio (similar a Estrasburgo).

Micro-cogeneración

La micro-CHP requiere demanda térmica sostenida para operar eficientemente. Berlín permite un uso continuo durante invierno, maximizando la recuperación de calor [62]. En París, la

estacionalidad reduce el número de horas útiles, y en Málaga la escasa carga térmica invernal limita severamente su aprovechamiento [63].

4.3.4. Representatividad climática y extrapolación

La selección de Berlín, París y Málaga cubre los principales macroclimas europeos: continental, oceánico y mediterráneo [64]. Esta estrategia se alinea con criterios metodológicos empleados en normativas como la Directiva EPBD [65] y estudios paneuropeos de eficiencia energética. Las conclusiones obtenidas podrán extrapolarse a múltiples contextos climáticos dentro del continente.

Las tres ubicaciones seleccionadas permiten simular condiciones representativas de demanda térmica en Europa. Esto posibilita una evaluación rigurosa del comportamiento estacional de tecnologías de climatización residencial eficiente, como bombas de calor o micro-cogeneración. La diversidad climática cubierta garantiza la validez generalizada de los resultados, contribuyendo a un diseño energético más robusto.

4.4. Condiciones de simulación

Con el objetivo de evaluar el rendimiento térmico y energético de los sistemas de climatización bajo estudio, se ha acotado el periodo de simulación exclusivamente a la **época de calefacción**. Esto permite centrar el análisis en la capacidad de respuesta de los sistemas ante la demanda térmica invernal, que representa el mayor reto operativo desde el punto de vista del confort térmico y la eficiencia energética.

En consecuencia, la simulación se ha restringido a los meses de:

Octubre, Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero, Marzo y Abril

Durante estos siete meses se producen las condiciones ambientales típicas de baja temperatura exterior que activan los sistemas de calefacción, siendo irrelevante simular el comportamiento en temporada de refrigeración, al no ser objeto del presente estudio.

Asimismo, se ha considerado una selección geográfica que permite evaluar el desempeño de las tecnologías en tres climas representativos de Europa, abarcando un amplio espectro de condiciones térmicas:

- **Málaga (España):** clima mediterráneo cálido con inviernos suaves.
- **París (Francia):** clima oceánico templado con inviernos moderados.
- **Berlín (Alemania):** clima continental con inviernos fríos y mayor exigencia térmica.

Esta distribución permite analizar la adaptabilidad de los sistemas a diferentes contextos climáticos, desde zonas de baja carga térmica (como Málaga), hasta escenarios exigentes en calefacción (como Berlín), proporcionando así una visión comparativa completa y representativa del entorno europeo.

4.5. Bomba de calor

La aplicación de bombas de calor como solución de climatización residencial se encuentra actualmente en el centro de las estrategias europeas para la descarbonización del sector edificatorio. Gracias a su capacidad para extraer energía térmica del entorno y transferirla al interior de la vivienda con una eficiencia elevada (COP superior a 3 en condiciones moderadas), se posicionan como una alternativa prioritaria frente a los sistemas basados en combustibles fósiles. No obstante, esta eficiencia puede verse comprometida en climas fríos, donde la temperatura exterior condiciona el rendimiento del sistema.

En este contexto, se procede a modelar un sistema de calefacción residencial basado en bomba de calor aire-agua mediante simulación dinámica con TRNSYS. El objetivo es evaluar su comportamiento térmico, eficiencia estacional y capacidad de respuesta en distintos escenarios de aislamiento y condiciones exteriores representativas del clima europeo. A través de este análisis, se pretende identificar los límites operativos de esta tecnología, así como su impacto potencial en la demanda energética total del edificio.

Los resultados obtenidos servirán de base para una comparación rigurosa con tecnologías emergentes como la micro-cogeneración, lo que permitirá establecer recomendaciones fundamentadas para la elección de soluciones sostenibles en climatización residencial.

4.5.1. Modelo Daikin Altherma 3 Bibloc ERLA11DV3

Para la simulación del sistema basado en energía aerotérmica, se ha seleccionado el modelo **Daikin Altherma 3 Bibloc ERLA11DV3**. Esta bomba de calor aire-agua de alta eficiencia

está diseñada para aplicaciones residenciales y destaca por su capacidad de operar incluso en condiciones climáticas extremas, con temperaturas exteriores de hasta $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Características técnicas destacadas

- **Unidad exterior:** ERLA11DV3
- **Unidad interior compatible:** EBVX11S18D6V o EBVZ16S18D6V (bizona con acumulador)
- **Modo calefacción:**
 - Potencia nominal a $7/35\text{ }^{\circ}\text{C}$: 10.60 kW
 - Consumo eléctrico nominal: 2.18 kW
 - COP nominal: 4.87
- **Modo refrigeración:**
 - Potencia nominal a $35/7\text{ }^{\circ}\text{C}$: 11.20 kW
 - Consumo eléctrico nominal: 3.43 kW
 - EER nominal: 3.26
- **SCOP ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$):** 4.72 (Clase energética A+++)
- **Rango de temperatura exterior:** de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $43\text{ }^{\circ}\text{C}$
- **Temperatura máxima de impulsión de agua:** $65\text{ }^{\circ}\text{C}$
- **Refrigerante:** R-32 (3,8 kg, PCA: 675)
- **Compresor:** tipo SWING, con bajo nivel de ruido (62 dB(A))

Eficiencia energética y sostenibilidad

La unidad ERLA11DV3 ha sido clasificada con:

- **Clase energética A+++** para impulsión a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$
- **Clase energética A++** para impulsión a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gracias a su alto COP y al uso de refrigerante R-32 con bajo potencial de calentamiento global (GWP), este equipo contribuye a una reducción significativa de las emisiones indirectas de CO₂, siendo compatible con políticas de descarbonización y eficiencia energética.

Instalación y dimensiones

- Dimensiones unidad exterior (Al. × An. × F.): 870 × 1100 × 460 mm
- Peso unidad exterior: 101 kg
- Alimentación eléctrica: Monofásica, 230 V
- Caudal de aire: 3350 m³/h
- Longitud máxima de línea frigorífica: hasta 50 m (desnivel máx: 30 m)

4.5.2. Esquema base y modelado

Descripción general del esquema hidráulico

La Figura 4.13 muestra el diagrama conceptual de la instalación de bomba de calor aire-agua desarrollada en este trabajo. El circuito de impulsión de agua caliente (líneas rojas) y el de retorno de agua fría (líneas azules) conforman un lazo cerrado que conecta:

1. La unidad exterior de la bomba de calor
2. La batería de suelos radiantes del sistema de climatización
3. El depósito de inercia hidráulica
4. La red de válvulas de equilibrado y control

De esta forma se asegura el caudal mínimo exigido por el fabricante de la máquina y se facilita el control sobre la temperatura de impulsión hacia los emisores.

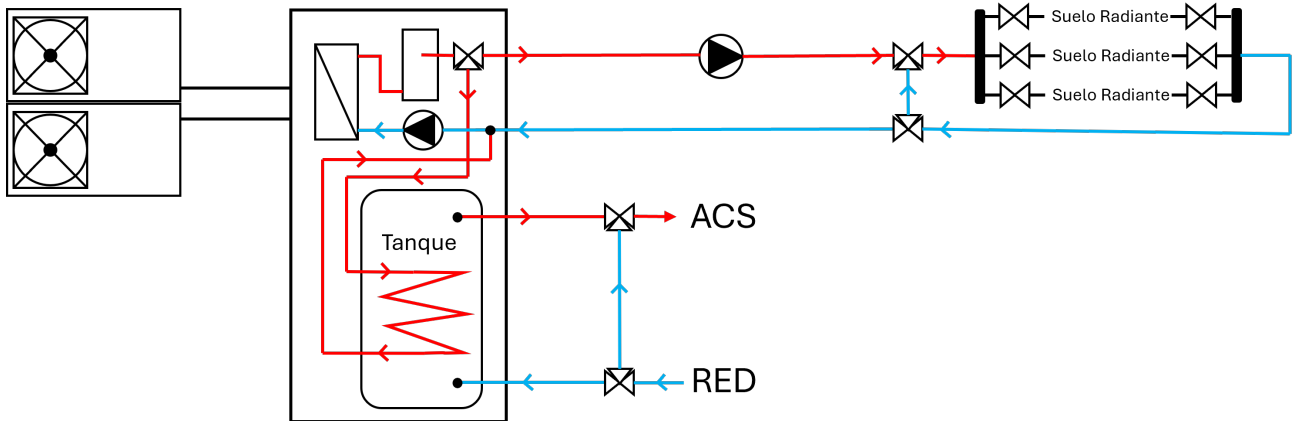


Figura 4.13. Esquema base de la instalación de bomba de calor aire-agua objeto de estudio.

Estrategia de modelado en TRNSYS

La Figura 4.14 (incluida a modo de referencia) muestra la interconexión de los *Types* usados, así como los puntos clave de intercambio de energía y señales de control.

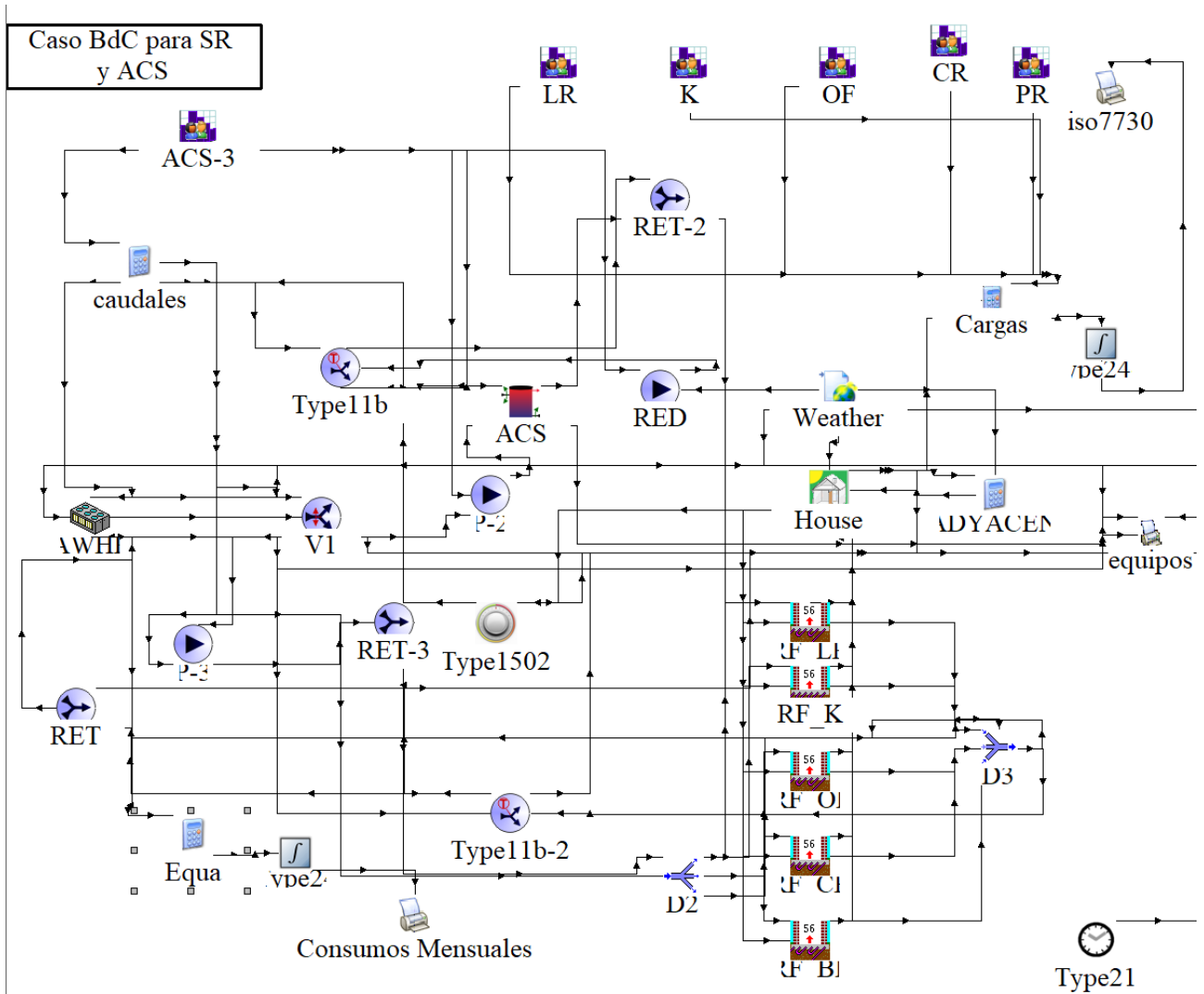


Figura 4.14. Esquema de modelado en TRNSYS.

La estrategia de modelado se basa en el uso de TRNSYS, un software de simulación energética modular y transitoria, para representar detalladamente un sistema de calefacción con bomba de calor aire-agua. El objetivo principal es comparar cuantitativamente esta tecnología bajo las mismas condiciones operativas, evaluando indicadores de desempeño como la eficiencia (coeficiente de rendimiento, *COP*) y el consumo energético estacional. TRNSYS permite integrar múltiples componentes en la simulación de forma flexible, reproduciendo el comportamiento acoplado del equipo generador de calor, el almacenamiento térmico y la entrega de calor al espacio acondicionado.

Configuración del modelo

La configuración del modelo incluye dos componentes clave: la bomba de calor aire-agua, representada con el **Type941**, y un tanque de almacenamiento de agua caliente, modelado con **Type4a**. El **Type941** corresponde a una bomba de calor de ciclo eléctrico de una sola etapa que transfiere calor entre un flujo de aire exterior y un circuito hidráulico de agua. En modo calefacción, este componente absorbe energía del aire ambiente (enfriándolo) y la cede al agua de calefacción, elevando su temperatura. El modelo de la bomba de calor se basa en datos de catálogo proporcionados por el fabricante: utiliza mapas de rendimiento para determinar la capacidad de calentamiento entregada al agua y la potencia eléctrica consumida, en función de la temperatura del agua de retorno y de la temperatura (y humedad) del aire de entrada. De este modo se capturan las variaciones del *COP* con las condiciones de operación reales, incluido el efecto de la humedad del aire exterior sobre el evaporador. Cabe señalar que el **Type941** representa un equipo de velocidad fija que opera sólo en régimen *on/off* a plena capacidad, lo que implica la necesidad de un control adecuado para satisfacer cargas parciales sin ciclos de arranque/parada excesivos.

El segundo componente principal es el tanque de acumulación térmica (**Type4a**). Se trata de un depósito de agua estratificado, dividido en nodos o capas térmicamente homogéneas para modelar el gradiente de temperaturas en altura dentro del tanque. En caso necesario, el número de nodos puede reducirse a uno para emular un tanque completamente mezclado (sin estratificación). El tanque actúa como elemento de inercia y enlace entre el circuito primario de generación de calor y el circuito secundario de consumo. En la configuración adoptada, la bomba de calor calienta el agua del tanque en el circuito primario, cargándolo térmicamente, y luego el circuito de distribución toma agua caliente desde el tanque para alimentar los emisores de calefacción del espacio (suelos radiantes) o para el ACS. De esta forma, ambos circuitos (producción y consumo) quedan acoplados a través del almacenamiento, permitiendo desacoplar temporalmente la generación de la demanda. Esto aporta estabilidad al funcionamiento de la bomba de calor (evitando arranques y paradas frecuentes) a la vez que garantiza el suministro de calor según las necesidades térmicas instantáneas.

Esquema de control

Para controlar la temperatura del sistema se implementó un esquema de control *on/off* mediante un termostato de tipo *aquastat* (**Type2**). Este controlador monitorea la temperatura del espacio acondicionado y enciende la bomba de calor cuando dicha temperatura desciende por debajo de la consigna de calefacción, apagándola de nuevo al alcanzarse un valor superior

de histéresis. Debido a que el modelo **Type941** no dispone de modulación continua de potencia (sólo opera a capacidad nominal fija), el control por histéresis descrito es necesario para ajustar la producción de calor a cargas parciales sin sobredimensionar el equipo. Adicionalmente, se incluyeron componentes de bomba de circulación (**Type3/Type110**) para impulsar el fluido en el circuito primario de la bomba de calor y en el circuito secundario de emisores, asegurando caudales nominales constantes a través del evaporador y del intercambiador del tanque durante el funcionamiento del sistema.

Condiciones de simulación

La simulación se llevó a cabo bajo condiciones climáticas y de uso representativas del caso de estudio. Se utilizó un archivo meteorológico típico de la localidad (formato TRY), leído mediante el procesador climático de TRNSYS (**Type15**), para suministrar en cada paso horario la temperatura del aire exterior, la humedad relativa, la radiación solar y demás variables ambientales. El horizonte temporal simulado corresponde a la temporada de demanda de calefacción (de octubre a abril), abarcando los meses fríos.

Se fijó una temperatura interior de consigna en las zonas acondicionadas, de modo que la bomba de calor entrara en operación para compensar las pérdidas cuando la temperatura interior tendía a descender por debajo de ese valor, y se detuviera al alcanzarse nuevamente la condición de confort.

Supuestos principales

- **Régimen cuasi-estacionario:** se asumió que la bomba de calor opera en equilibrio estable en cada intervalo de cálculo, aplicando directamente los datos de rendimiento estático (capacidad y *COP*).
- **Control ideal:** el termostato actúa instantáneamente y la conmutación frecuente de la bomba de calor no conlleva penalizaciones adicionales de eficiencia más allá de las inherentes al funcionamiento *on/off*.
- **Caudales constantes:** los caudales de agua a través del evaporador de la bomba de calor y del circuito de emisión se mantuvieron constantes (valor de diseño) durante toda la simulación, sin modelar variaciones debidas a bombas de velocidad variable ni efectos transitorios del flujo. Se considera el agua como fluido incompresible con propiedades constantes.

- **Pérdidas térmicas simplificadas:** se despreciaron las pérdidas de calor en tuberías de conexión y en los emisores, concentrando las únicas pérdidas térmicas en el tanque de almacenamiento. Éstas se modelaron mediante un coeficiente global de transmisión térmica fijo para el tanque, determinado según las características de su aislamiento.
- **Dimensionamiento del equipo:** la bomba de calor se seleccionó con una capacidad ligeramente superior a la carga máxima de calefacción estimada, de forma que pudiera cubrir la demanda de diseño en las condiciones más desfavorables. No se consideró ningún sistema de respaldo auxiliar, enfocando el análisis comparativo únicamente en la bomba de calor frente a la tecnología alternativa bajo estudio.

La metodología de modelado adoptada equilibra el detalle y la simplicidad para un estudio de comparación tecnológica. El uso de TRNSYS con componentes validados (*Type941*, *Type4a*, etc.) proporciona flexibilidad y confianza en la representación del desempeño del sistema. La incorporación de datos empíricos de fabricante en el modelo de la bomba de calor asegura que las variaciones de eficiencia con la temperatura queden correctamente reflejadas, aportando validez a la comparación con el sistema convencional de referencia. Asimismo, la inclusión de un tanque de inercia estratificado se justifica por su importancia en sistemas reales para estabilizar el funcionamiento del generador y optimizar la entrega de calor.

4.6. Micro-cogeneración

La micro-cogeneración representa una de las tecnologías con mayor potencial para diversificar el panorama energético residencial, especialmente en un contexto europeo donde se proyecta una creciente electrificación del parque térmico. Estos sistemas permiten la generación simultánea de electricidad y calor útil a nivel doméstico, lo cual no solo incrementa la eficiencia global del sistema (por encima del 90 % en condiciones óptimas), sino que reduce la dependencia de la red eléctrica durante los picos de demanda.

En esta sección se presenta la simulación de un sistema doméstico de micro-cogeneración basado en pila de combustible alimentada con hidrógeno, siguiendo una configuración inspirada en soluciones comerciales como ENE-FARM. Mediante la herramienta TRNSYS, se modela el comportamiento operativo del sistema en condiciones reales, considerando la variabilidad estacional de la demanda térmica y el perfil horario de uso residencial.

La modelización incluye tanto la producción de calor para calefacción y ACS como la producción eléctrica descentralizada, permitiendo evaluar el grado de autosuficiencia energética y

las emisiones asociadas. Además, se analiza la interacción entre la cogeneración y la envolvente del edificio, así como su sensibilidad ante diferentes niveles de aislamiento térmico. Esta simulación proporciona una visión detallada de la viabilidad técnica y energética de estos sistemas en comparación con soluciones plenamente eléctricas, como las bombas de calor.

4.6.1. Modelo Viessmann Vitovalor PT2 (E11T)

Para simular la generación combinada de calor y electricidad en un entorno residencial, se ha seleccionado el sistema de micro-cogeneración **Viessmann Vitovalor PT2**, concretamente el modelo **E11T**. Se trata de una solución compacta e innovadora que integra una pila de combustible de baja potencia junto con una caldera de condensación de gas para cubrir demandas térmicas pico, y un depósito de ACS de 220 litros.

El sistema está especialmente diseñado para viviendas unifamiliares y adosadas, con un consumo térmico anual de hasta 35 000 kWh y una demanda eléctrica de hasta 6 200 kWh, ofreciendo una solución altamente eficiente para autoconsumo energético.

Características técnicas principales

- **Pila de combustible:**
 - Potencia eléctrica nominal: 750 W
 - Potencia térmica nominal: 1.1 kW
 - Eficiencia eléctrica: 37 %
 - Eficiencia global: hasta 92 % (PCI)
- **Caldera de condensación integrada (carga pico):**
 - Rango de potencia térmica: 0.9 – 11.4 kW
 - Eficiencia térmica: hasta 98 % (PCS)
- **Depósito acumulador de ACS:**
 - Capacidad: 220 litros
 - Material: acero inoxidable
- **Rendimiento y operación:**

- Hasta 18 kWh de generación eléctrica diaria
- Funcionamiento continuo: hasta 45.5 h seguidas antes de fase de regeneración (2.5 h)
- Emisiones acústicas: 48 dB(A)
- Control inteligente con pantalla táctil a color de 7"
- Gestión energética autoaprendente

Dimensiones e instalación

- Superficie ocupada: 0.72 m²
- Dimensiones (ancho × fondo × alto): 595 mm × 1200 mm × 1800 mm
- Peso total: 326 kg
- Combustible: Gas natural E(H)/LL(L)

4.6.2. Esquema base y modelado

Descripción general del esquema hidráulico

En la Figura 4.15 se representa el esquema base del sistema de microgeneración con caldera auxiliar, empleado como referencia para el modelado energético en TRNSYS. El sistema se articula en torno a una unidad de microcogeneración de gas natural (CHP), conectada hidráulicamente en paralelo con una caldera convencional que actúa como respaldo térmico.

La producción térmica se distribuye hacia una red de climatización mediante una válvula mezcladora de tres vías, mientras que el retorno se acumula en un colector común, que recoge la energía no utilizada y cierra el lazo hidráulico.

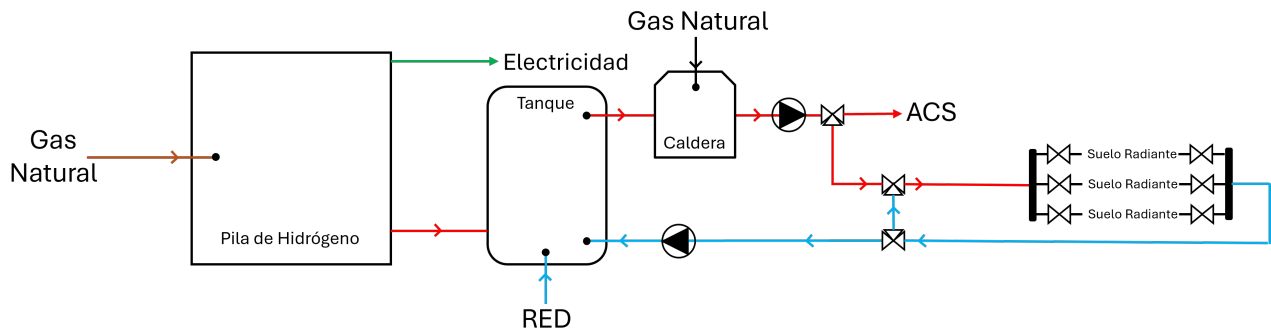


Figura 4.15. Esquema base del sistema de microgeneración con caldera de apoyo.

Estrategia de modelado en TRNSYS

La estructura de modelado sigue el principio modular de TRNSYS 17, en el que cada componente físico es representado por un bloque funcional (*Type*) conectado mediante nodos de temperatura y caudal. La Figura 4.16 ilustra el modelo implementado, incluyendo la lógica de control de activación entre CHP y caldera en función de la demanda térmica instantánea.

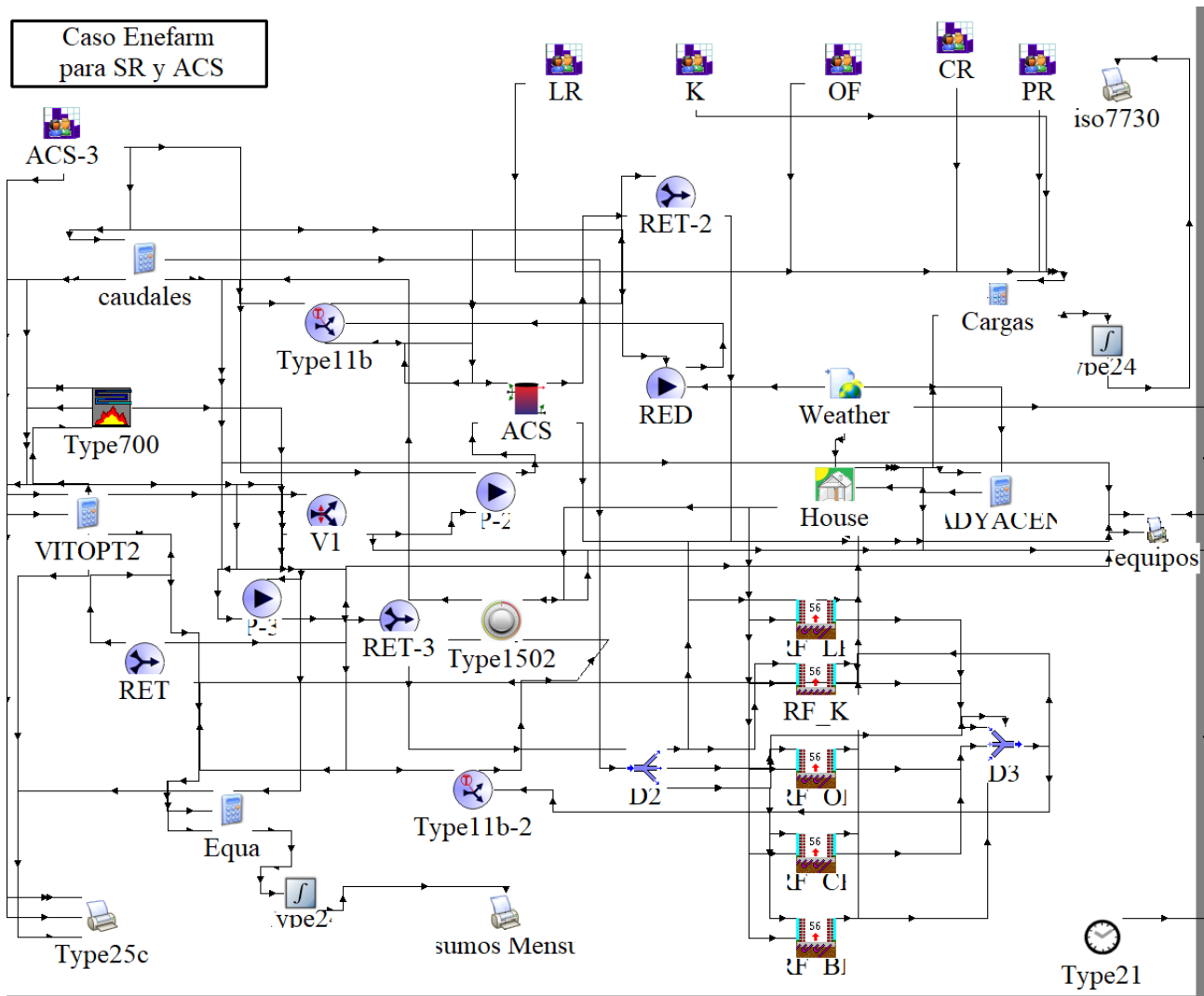


Figura 4.16. Esquema de modelado del sistema de microgeneración en TRNSYS.

Para analizar el sistema de microgeneración doméstica, se ha optado por un enfoque de **modelado tipo caja negra**, caracterizando el generador de pila de combustible únicamente mediante sus rendimientos globales (eléctrico y térmico) en lugar de modelar detalladamente los procesos físico-químicos internos. Este enfoque simplifica la implementación y se basa en datos de desempeño proporcionados por el fabricante o ensayos, lo cual es habitual en simulaciones de micro-CHP dada la complejidad de un modelado de primeros principios.

En efecto, debido a la falta de información detallada sobre la dinámica interna, la microgeneración se representa mediante relaciones empíricas que ligan la entrada de combustible con las salidas de electricidad y calor útil. El combustible de entrada es gas natural (metano), definido por su caudal másico \dot{m}_{gas} y su poder calorífico inferior (PCI). A partir de estos parámetros se calculan, en cada paso de simulación, la potencia eléctrica generada (W_{el}) y el calor

térmico recuperado (Q_{th}) mediante las siguientes expresiones de eficiencia global del generador:

- **Eficiencia eléctrica:** se define como la relación entre la potencia eléctrica generada por la microgeneración (W_{el}) y la energía química del gas natural consumido, expresada como el producto entre el caudal másico del gas y su poder calorífico inferior (PCI):

$$\eta_{el} = \frac{W_{el}}{\dot{m}_{gas} \cdot PCI} \quad (4.15)$$

donde:

- η_{el} : eficiencia eléctrica (adimensional)
 - W_{el} : potencia eléctrica generada [W]
 - \dot{m}_{gas} : caudal másico de gas natural [kg/s]
 - PCI: poder calorífico inferior del gas natural [J/kg]
- **Eficiencia térmica:** se define como la relación entre el calor útil recuperado por el sistema (Q_{th}) y la energía química del combustible consumido:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{\dot{m}_{gas} \cdot PCI} \quad (4.16)$$

donde:

- η_{th} : eficiencia térmica (adimensional)
- Q_{th} : calor útil recuperado [W]
- \dot{m}_{gas} : caudal másico de gas natural [kg/s]
- PCI: poder calorífico inferior del gas natural [J/kg]

Los valores de η_{el} y η_{th} se ajustan según las condiciones de operación nominales del equipo (por ejemplo, datos del sistema *Ene-Farm* o *Viessmann Vitovalor*) y pueden depender del régimen de carga. En este modelo simplificado se asume, para cada instante, un rendimiento constante correspondiente al punto de operación predominante.

Cabe destacar que, si bien un modelo de caja negra es menos adaptable a cambios en el dispositivo (sus parámetros están calibrados para un equipo específico), permite integrar adecuadamente la microgeneración en el sistema edilicio sin requerir un desarrollo complejo del modelo interno. Esto es coherente con prácticas recomendadas en la literatura, donde las micro-CHP se modelan mediante correlaciones globales debido a la impracticabilidad de un modelo detallado en aplicaciones de edificación.

Configuración del modelo y componentes TRNSYS

En el software TRNSYS, el esquema completo del sistema se ha construido interconectando componentes prediseñados y ecuaciones personalizadas para representar cada subsistema. La **microgeneración por pila de combustible** se implementa mediante un submodelo que toma como entrada el flujo de gas natural y, aplicando los rendimientos η_{el} y η_{th} , calcula la potencia eléctrica W_{el} y el calor Q_{th} entregados en cada instante.

Toda la **electricidad generada** se supone autoconsumida por la vivienda, es decir, se destina a cubrir la demanda eléctrica interna reduciendo en igual magnitud la compra de energía de la red. De este modo, en la simulación se descuenta W_{el} de los perfiles de consumo eléctrico del edificio, reflejando el ahorro directo de electricidad.

Por otra parte, el **calor útil recuperado** (Q_{th}) es aprovechado para los servicios térmicos de la vivienda (agua caliente sanitaria – ACS– y calefacción por suelo radiante). Este calor se utiliza para **precalentar agua de red** antes de su almacenamiento, circulando a través de un **tanque de acumulación térmica** (*Type4a* de TRNSYS). El *Type4a* corresponde a un tanque estratificado de almacenamiento de agua, con posiciones de entrada/salida fijas en distintas alturas, lo que permite modelar la estratificación térmica del fluido almacenado. Así, Q_{th} ingresa al tanque elevando la temperatura del agua en el nivel adecuado, almacenando energía térmica para su uso diferido.

Desde el tanque de almacenamiento, el agua precalentada se distribuye hacia los consumos de ACS y al circuito de calefacción. Si la temperatura del agua en el tanque no alcanzase la **consigna de servicio** requerida (por ejemplo, 60 °C para ACS o la temperatura de envío del suelo radiante), el flujo es desviado a través de una **caldera auxiliar de gas** (modelada con un componente de *caldera simple* de TRNSYS, *Type3* o equivalente). Esta caldera auxiliar se encarga de aportar el calor suplementario necesario para elevar el agua a la temperatura de consigna sólo cuando es necesario, permaneciendo inactiva cuando el aporte de la microgeneración y el tanque son suficientes.

En términos de simulación, el modelo de caldera intenta mantener la temperatura de salida fijada, limitado por su capacidad máxima, y calcula el consumo de gas correspondiente según su rendimiento nominal. El usuario especifica la eficiencia de combustión de la caldera, con la cual el componente estima la energía de combustible requerida para suplir la demanda térmica faltante. De esta manera, la caldera auxiliar actúa como respaldo del generador principal, una configuración coherente con instalaciones reales donde la pila de combustible es apoyada por una caldera de gas convencional para atender puntas de demanda térmica.

El **sistema de calefacción por suelo radiante** se modela mediante el componente *Type653: Simple Floor Heating System* de TRNSYS. Este submodelo representa una losa radiante de forma simplificada, asumiendo que el forjado puede considerarse como una masa isotérmica única y que la transferencia de calor entre el fluido circulante y la losa se rige por una efectividad de intercambio térmico. Gracias a esta aproximación, se puede calcular la potencia cedida al ambiente por el suelo radiante en función del caudal y temperatura del agua de calefacción, así como de las características del piso (capacidad térmica, resistencia, etc.).

La distribución del calor almacenado en el tanque hacia **ACS o calefacción** está gobernada por **válvulas hidráulicas de tres vías** (*Type11* de TRNSYS) que actúan como mezcladores o derivadores de flujo controlados. Estos componentes permiten emular tees y *bypass* hidráulicos bajo control externo, algo frecuente en sistemas térmicos complejos. En el modelo se configuran las válvulas en modos de operación adecuados (modos 1–5 para fluido líquido) de manera que, según las señales de control, dirijan el fluido caliente bien hacia un intercambiador de ACS o hacia el circuito del suelo radiante.

Por ejemplo, ante una demanda de ACS, la válvula correspondiente deriva el flujo caliente del tanque hacia el serpentín de calentamiento de agua sanitaria hasta satisfacer esa demanda; si no hay demanda de ACS, el calor se entrega al bucle de calefacción de suelo radiante.

Esta estrategia de control por válvulas asegura que cada fuente térmica reciba prioridad según criterios predefinidos (p. ej., priorizar siempre ACS por razones de confort e higiene, o dar preferencia a calefacción en determinados horarios).

Control del sistema y simulación estacional

El modelo incorpora una capa de **gestión y control** que coordina la operación de los distintos componentes en respuesta a las condiciones de demanda y temperatura. Se emplean **perfiles horarios de demanda térmica** mediante el componente *Type14: Time Dependent Forcing Function*, que permite introducir cargas variables con un patrón repetitivo diario o estacional.

A través de este mecanismo, se han implementado perfiles típicos de uso de ACS (consumos diarios de agua caliente en horarios pico de mañana y noche) y perfiles de carga térmica para calefacción (en función de la climatología estacional, con mayor demanda en invierno y prácticamente nula en verano). Los datos de estos perfiles se proporcionan como series temporales (por ejemplo, valores horarios de demanda en kW o en L/h de ACS para un día tipo), que el *Type14* interpola linealmente entre puntos y reproduce cíclicamente cada 24 horas.

Sobre los perfiles de demanda, se construyen **ecuaciones de control personalizadas** (definidas en el gestor de ecuaciones de TRNSYS o empleando componentes lógicos) que determinan la lógica de operación: por ejemplo, se define la condición de arranque/parada de la microgeneración en función de la demanda térmica del momento y del estado de carga del tanque.

En este trabajo, se ha optado por un control de la microgeneración orientado a **seguimiento de la carga térmica** del edificio: el generador de pila de combustible se enciende cuando hay demanda significativa de calor (ACS o calefacción) y se apaga o modula a potencia mínima en ausencia de demanda térmica. Esta estrategia de seguimiento de demanda térmica busca maximizar el aprovechamiento del calor cogenerado y evitar excedentes térmicos.

La literatura señala que operar micro-CHP en modo *thermal load following* suele conllevar mayor eficiencia global del sistema que en modo *electrical load following*, ya que se reduce la disipación de calor sobrante y se mejora la cobertura de las necesidades térmicas de la vivienda. Asimismo, el control implementado garantiza que la caldera auxiliar solo entre en funcionamiento cuando la potencia térmica del generador de pila de combustible (y el calor almacenado en el tanque) no sean suficientes para alcanzar las temperaturas de consigna.

Mediante expresiones lógicas, se compara constantemente la temperatura del tanque con las consignas de ACS/calefacción y, si ésta resulta inferior mientras existe demanda, se activa la caldera auxiliar para compensar la diferencia. Del mismo modo, las válvulas (*Type11*) se gobiernan con señales binarias o proporcionales derivadas de la demanda: se prioriza el circuito de ACS cuando hay solicitud de agua caliente sanitaria, conmutando nuevamente hacia calefacción una vez satisfecha aquella.

Este esquema de control por prioridades y las reglas de gestión horaria permiten simular de forma realista la operación estacional: en invierno, el generador funcionará más regularmente para cubrir calefacción y ACS, mientras que en verano posiblemente opere solo para ACS (mucho menos frecuente), permaneciendo apagado largos periodos.

Indicadores de rendimiento monitorizados

El modelo TRNSYS desarrollado no solo calcula balances energéticos instantáneos, sino que también acumula información para evaluar el desempeño global del sistema de microgeneración. Entre las **variables monitorizadas clave** se encuentran:

- **Fracción de cobertura térmica de la microgeneración:** representa la proporción

de la demanda térmica total (ACS + calefacción) suministrada por el generador de pila de combustible en lugar de la caldera auxiliar. Se obtiene comparando la energía térmica entregada desde la microgeneración (directamente o vía tanque) con la energía suministrada por la caldera de apoyo.

- **Energía eléctrica autoproducida:** es la energía eléctrica total generada por la pila de combustible a lo largo de la simulación que ha sido consumida directamente en la vivienda. Esta métrica equivale al ahorro de electricidad de la red gracias al autoconsumo. Se integra W_{el} en el tiempo (por ejemplo, en kWh anuales) para determinar cuánta energía eléctrica comprada se evita por la operación del micro-CHP.
- **Consumo total de gas natural:** se calcula integrando el flujo másico de gas consumido tanto por la microgeneración como por la caldera auxiliar, convertido a energía (normalmente en kWh PCI) a través del poder calorífico del combustible. Este valor refleja la **energía primaria** consumida por el sistema híbrido en el período simulado.
- **Eficiencia global del sistema (η_{total}):** se define como la fracción de la energía química del combustible que es convertida en energía útil (sumando electricidad y calor aprovechable). Matemáticamente,

$$\eta_{total} = \frac{W_{el} + Q_{th}}{\dot{m}_{gas} \cdot PCI},$$

calculada en base acumulativa o instantánea. Este indicador sintetiza el rendimiento conjunto de la microgeneración integrada con su aprovechamiento térmico.

La evaluación de estos indicadores a lo largo del periodo de calefacción ofrece una visión comprensiva del comportamiento del sistema de microgeneración.

Esta aproximación permite identificar patrones de operación óptimos y posibles mejoras de control. En resumen, la estrategia de modelado implementada – basada en un enfoque de caja negra para la pila de combustible, integración con componentes TRNSYS estándar y controles realistas – proporciona un modelo robusto para **evaluar el desempeño energético estacional** de un sistema doméstico de microgeneración.

La representación simplificada mediante rendimientos globales, debidamente justificada por la disponibilidad de datos y la experiencia previa, logra capturar el balance energético fundamental del sistema, mientras que la inclusión de detalles de control y almacenamiento permite analizar su respuesta ante perfiles de demanda reales.

5 | Resultados

5.1. Verificación del comportamiento térmico del modelo

Antes de proceder al análisis comparativo de los sistemas simulados, es fundamental verificar que los resultados obtenidos son coherentes y que el modelo TRNSYS se comporta de forma realista bajo las condiciones de operación impuestas. Para ello, se ha analizado la evolución temporal de la temperatura operativa en las zonas climatizadas, así como la temperatura superficial del suelo radiante, a lo largo de un día completo representativo, con un paso de tiempo de 10 minutos.

Cabe destacar que los datos aquí representados han sido extraídos de la simulación correspondiente a la ciudad de **Berlín**, seleccionada intencionadamente por presentar el clima más riguroso de entre las tres ubicaciones consideradas en este estudio (Berlín, París y Málaga). Dado que Berlín supone el mayor desafío térmico en términos de calefacción, comprobar que el sistema se comporta adecuadamente en este entorno implica que también lo hará en condiciones menos exigentes, lo que refuerza la validez de los resultados.

Temperatura operativa en zonas climatizadas

La Figura 5.1 muestra la evolución de la temperatura operativa en las distintas zonas de la vivienda para el sistema de bomba de calor, correspondiente al día 11 de febrero, mientras que la Figura 5.2 refleja el comportamiento térmico con micro-cogeneración, correspondiente al día 18 de febrero.

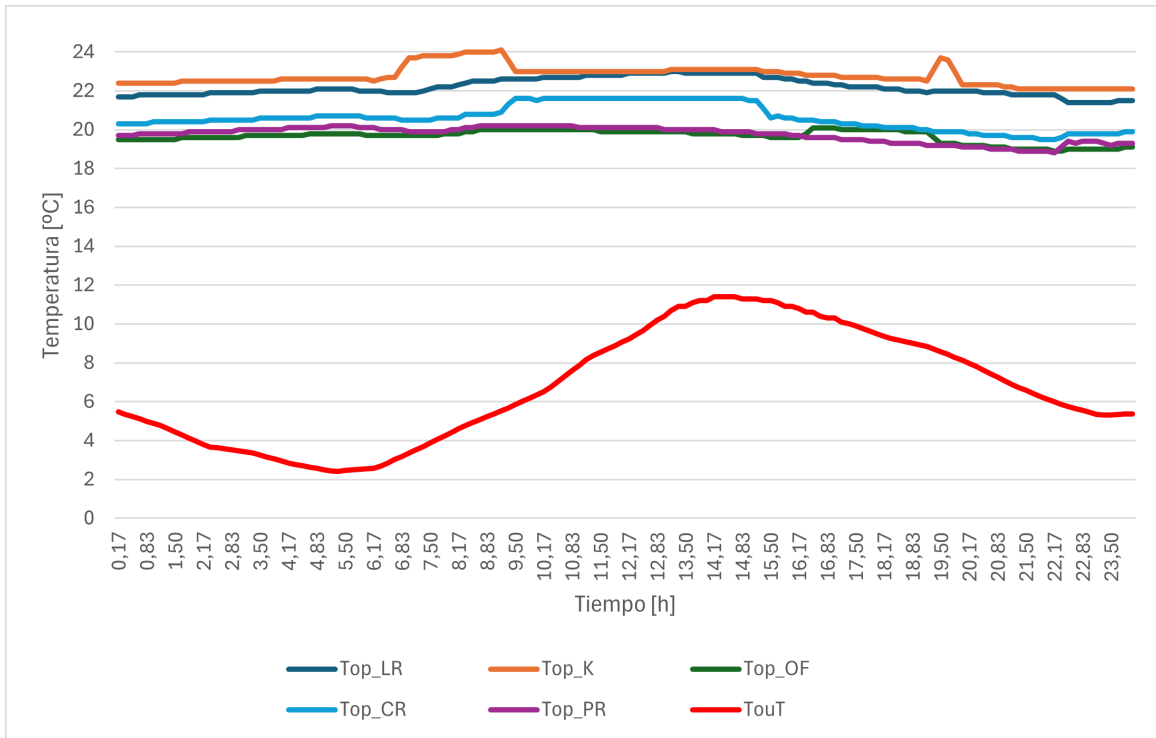


Figura 5.1. Temperatura operativa en zonas climatizadas – Sistema bomba de calor (24 h)

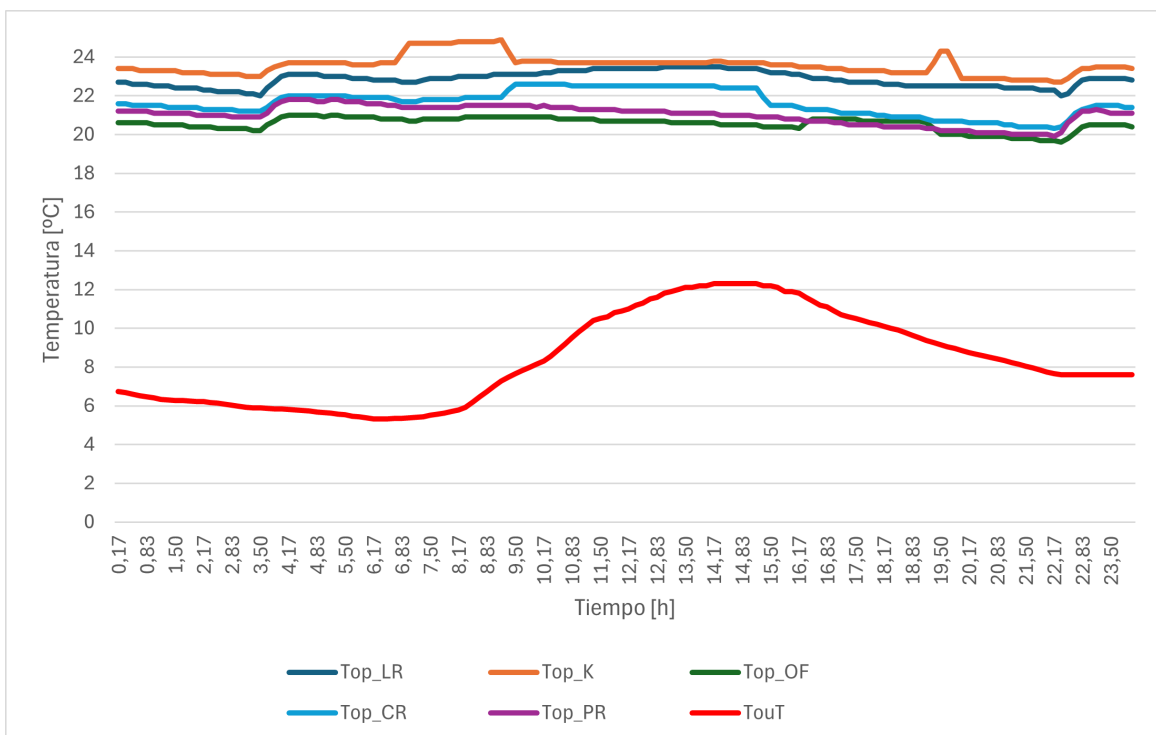


Figura 5.2. Temperatura operativa en zonas climatizadas – Sistema micro-cogeneración (24 h)

Las variables representadas corresponden a las siguientes estancias de la vivienda:

- **Top_LR**: Living Room (Salón)
- **Top_K**: Kitchen (Cocina)
- **Top_OF**: Office (Oficina)
- **Top_CR**: Children Room (Dormitorio de niños)
- **Top_PR**: Parents Room (Dormitorio principal)
- **Tout**: Temperatura exterior

En ambas figuras se aprecia que, a lo largo de las 24 h analizadas, las temperaturas interiores se mantienen estables —sin oscilaciones bruscas— y dentro del rango de confort habitual para calefacción (19–23,5 °C). Las ligeras diferencias entre estancias concuerdan con los perfiles de ocupación y la zonificación térmica del modelo. La separación entre las curvas interiores y la exterior (*Tout*) pone de manifiesto la buena respuesta tanto del sistema de climatización como de la envolvente térmica.

Temperatura del suelo radiante

Para evaluar los emisores, se analiza la temperatura superficial del suelo radiante en cada zona. La Figura 5.3 corresponde a la bomba de calor y la Figura 5.4 a la micro-cogeneración.

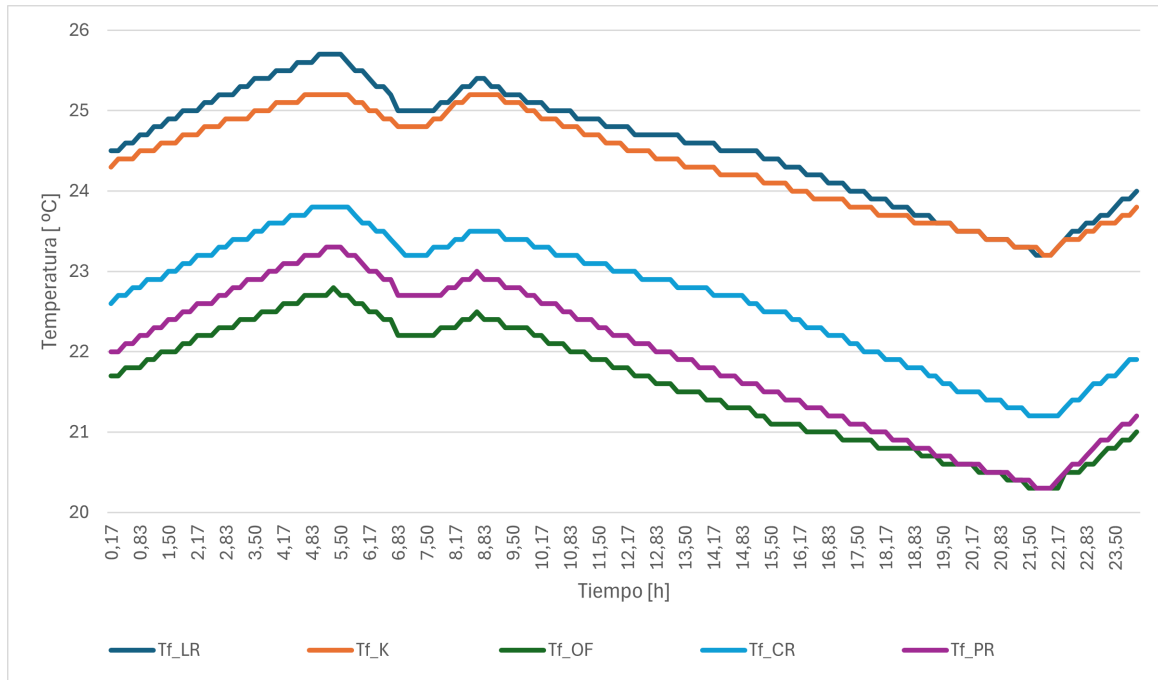


Figura 5.3. Temperatura del suelo radiante – Sistema bomba de calor (24 h)

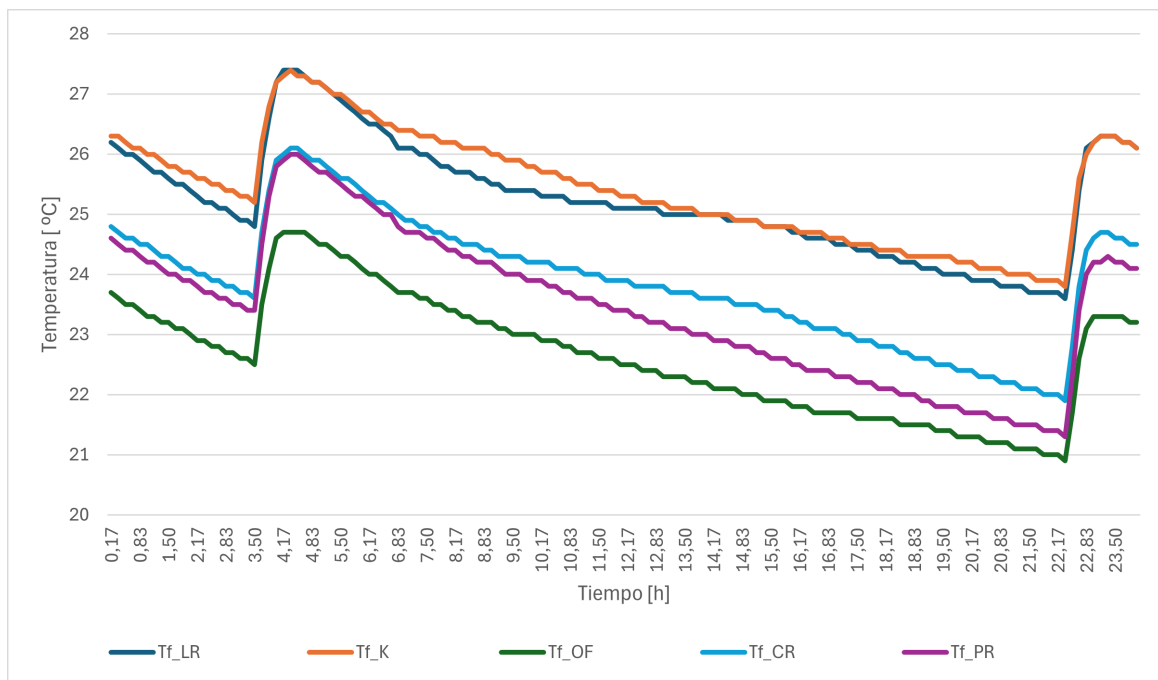


Figura 5.4. Temperatura del suelo radiante – Sistema micro-cogeneración (24 h)

En ambas configuraciones, la temperatura del suelo oscila dentro de los valores óptimos para calefacción por suelo radiante (21–29 °C). El sistema con bomba de calor presenta una leve modulación descendente durante los períodos de menor demanda, indicativa de un control

ajustado. Por su parte, la micro-cogeneración muestra un perfil ligeramente ascendente y más continuo, coherente con su régimen de funcionamiento estable.

La estabilidad térmica observada en el aire interior y en los emisores confirma que el modelo funciona correctamente, con una distribución homogénea del calor y un control eficaz para ambas tecnologías. Esto respalda la fiabilidad de los resultados para los análisis comparativos del estudio.

5.2. Parámetros de confort: PMV y PPD

Aunque el análisis de temperatura proporciona una primera aproximación al confort térmico, existen otros factores que influyen significativamente en la percepción humana del ambiente. Según la norma UNE-EN ISO 7730, el confort térmico depende tanto de las condiciones del entorno (temperatura del aire, temperatura media radiante, humedad relativa, velocidad del aire) como de las características del ocupante (nivel de actividad metabólica y ropa utilizada).

Con el objetivo de evaluar cuantitativamente el confort en cada zona acondicionada, se han empleado los índices PMV (Voto Medio Estimado) y PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas), ampliamente reconocidos en normativas internacionales y utilizados en el diseño y control de sistemas HVAC.

Índice PMV (Predicted Mean Vote)

El PMV estima el voto promedio que emitiría un gran número de personas sobre su sensación térmica en un determinado ambiente. La escala utilizada para expresar esta sensación se presenta en la Tabla 5.1, según la clasificación establecida en la norma UNE-EN ISO 7730.

El cálculo del PMV se basa en un balance energético del cuerpo humano y se expresa como:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L \quad (5.1)$$

Donde:

- M : tasa metabólica (W/m^2).

Tabla 5.1. Escala de sensación térmica correspondiente al índice PMV (UNE-EN ISO 7730)

Valor PMV	Sensación térmica
+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
0	Neutro (confortable)
-1	Ligeramente frío
-2	Frío
-3	Muy frío

- L : carga térmica del cuerpo, es decir, la diferencia entre el calor producido y el disipado en condiciones de confort.

El valor de L depende de parámetros como:

- W : trabajo mecánico externo (W/m^2).
- I_{cl} : aislamiento de la ropa ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$).
- t_a : temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$).
- t_r : temperatura media radiante ($^{\circ}\text{C}$).
- v_a : velocidad del aire (m/s).
- p_a : presión parcial del vapor de agua (Pa).

Índice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)

El índice PPD predice el porcentaje de personas que se sentirán térmicamente insatisfechas, incluso si la mayoría se encuentra en una condición de confort aceptable. Se calcula directamente a partir del PMV con la siguiente fórmula:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2} \quad (5.2)$$

Este índice permite clasificar los ambientes según la norma UNE-EN ISO 7730, como se resume en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Categorías del ambiente térmico según PMV y PPD (UNE-EN ISO 7730)

Categoría	Rango PMV	PPD máximo (%)
A	$-0,2 < PMV < 0,2$	<6%
B	$-0,5 < PMV < 0,5$	<10%
C	$-0,7 < PMV < 0,7$	<15%

Condiciones de diseño para el confort térmico

Para la evaluación de PMV y PPD en este caso de estudio, se han adoptado los valores recomendados en el RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios), definidos en la Tabla 5.3 para las condiciones estivales e invernales:

Tabla 5.3. Parámetros de diseño de confort utilizados en la simulación

Variable	Verano	Invierno
Factor de ropa (clo)	0.5	1.0
Tasa metabólica (met)	1.2	1.2
Trabajo externo (W/m ²)	0	0
Velocidad del aire (m/s)	0.2	0.2

Estos parámetros permiten simular el nivel de confort térmico percibido en cada estancia, considerando tanto las condiciones ambientales como las características del ocupante.

5.2.1. Cumplimiento del confort

Para comprobar la validez de los escenarios energéticos simulados y garantizar que los resultados posteriores se apoyan en unas condiciones de habitabilidad aceptables, se ha evaluado el

confort térmico mediante los índices PMV y PPD establecidos en la norma UNE-EN ISO 7730. En este análisis se consideran *horas de confort* aquellas cuya categoría PMV se sitúa en los rangos **A** o **B**, mientras que las categorías **C** o inferiores se agrupan como *horas de incomodidad*. Las Figuras 5.5–5.7 recogen el porcentaje de tiempo que cada estancia permanece en una u otra situación a lo largo de todo el periodo de simulación, promediando los meses para ofrecer una visión global del comportamiento de cada sistema en los tres climas estudiados.

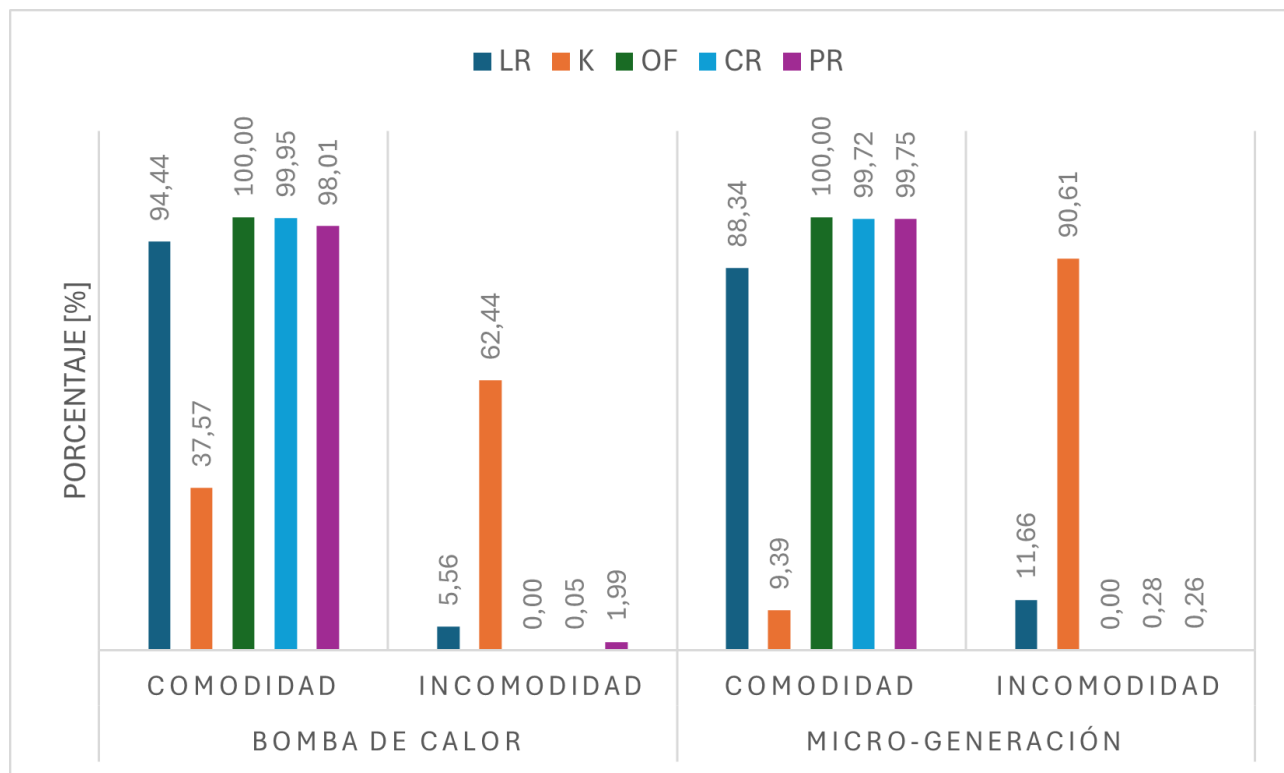


Figura 5.5. Distribución de horas de confort (categorías A+B) e incomodidad (C o peor) en Málaga.

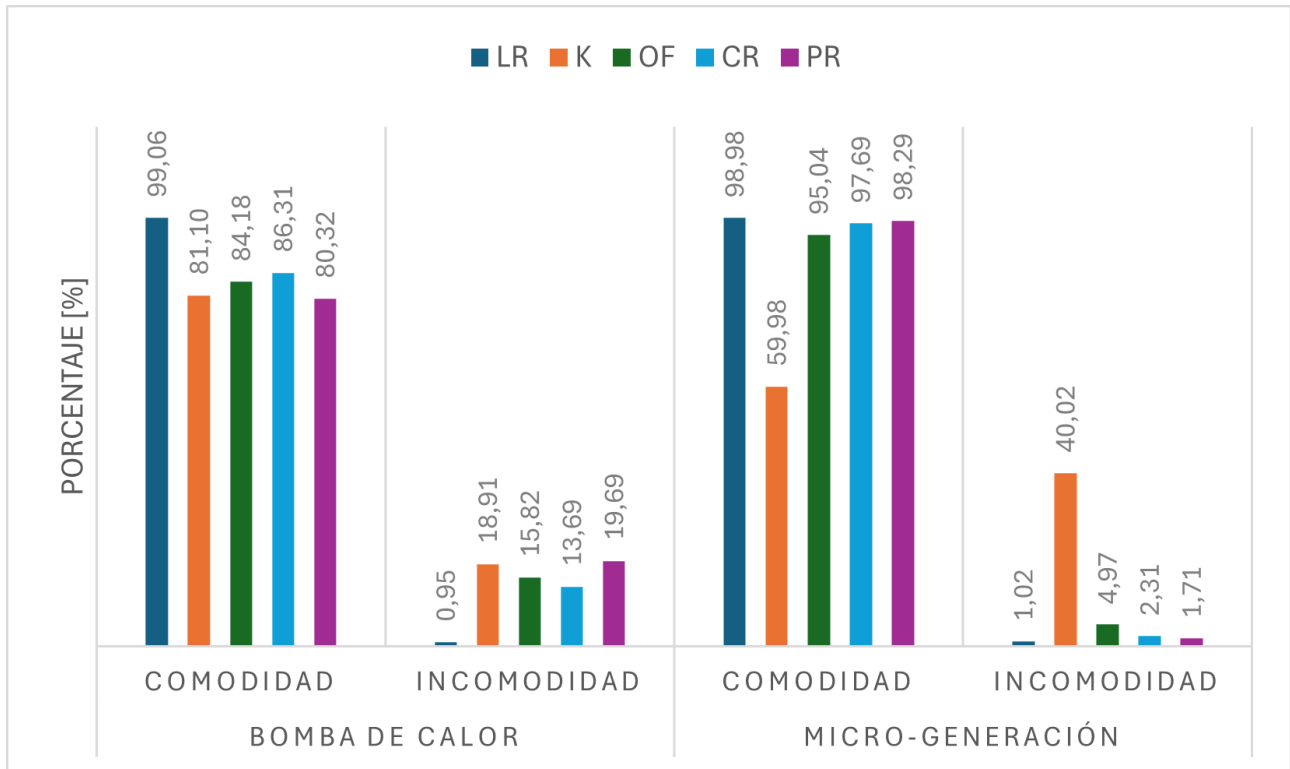


Figura 5.6. Distribución de horas de confort (categorías A+B) e incomodidad (C o peor) en París.

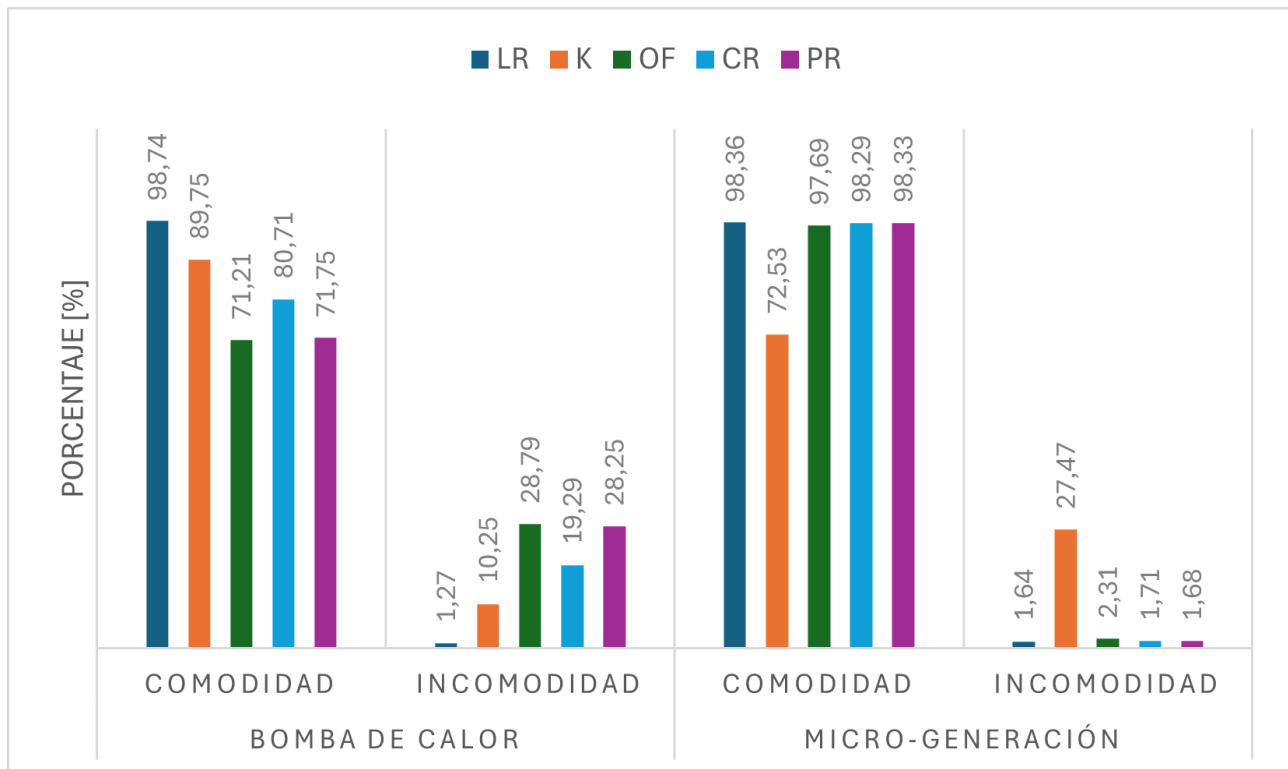


Figura 5.7. Distribución de horas de confort (categorías A+B) e incomodidad (C o peor) en Berlín.

En las tres localizaciones se constata que ambos sistemas —bomba de calor y micro-cogeneración— mantienen la mayoría de las estancias dentro de los rangos de confort durante un porcentaje muy elevado del tiempo, superando con holgura el umbral del 80 % exigido habitualmente por la normativa de referencia. El salón (**LR**), la habitación de los niños (**CR**) y la habitación de los padres (**PR**) presentan valores cercanos o superiores al 95 % en Berlín y París, y del 90 % en Málaga, lo que confirma que las consignas térmicas seleccionadas resultan adecuadas para la zona de estancia principal de la vivienda.

La única desviación reseñable se observa en la **cocina (K)**, especialmente acentuada en el clima cálido de Málaga: mientras el resto de estancias alcanzan niveles de confort comparables a los de los climas templado (París) y frío (Berlín), la cocina muestra un descenso pronunciado hasta el 38 % con bomba de calor y el 9 % con micro-cogeneración. El origen de este “pico” de incomodidad está en el *control centralizado* del sistema: al fijarse una única consigna de temperatura para toda la vivienda, el algoritmo prioriza el cumplimiento en los espacios de referencia (salón). La cocina, sometida a cargas internas adicionales, queda inevitablemente *sobrecalentada* —un efecto que se acentúa cuanto menor es la severidad del invierno, razón por la cual Málaga presenta los valores más altos.

Fuera de este caso puntual, la micro-cogeneración y la bomba de calor obtienen resultados muy similares: en Berlín y París la fracción de horas en categorías A+B supera el 90% en todas las zonas, de modo que los *datos térmicos empleados en los capítulos siguientes pueden considerarse plenamente válidos*, al haberse alcanzado condiciones de confort aceptables según la normativa internacional.

En suma, las gráficas confirman que los modelos termodinámicos ajustados para cada tecnología cumplen la función principal de proporcionar confort térmico a los ocupantes, garantizando que las comparaciones energéticas y ambientales presentadas en el resto del trabajo se basan en viviendas operacionalmente equivalentes y habitables.

5.3. Costes Iniciales

Para comparar las tecnologías de **bomba de calor** (aeroterminia) y **microgeneración tipo Enefarm** (microcogeneración por pila de combustible) en viviendas unifamiliares, se investigan sus **costes iniciales** (equipos) y **costes de instalación** en las tres ciudades europeas: **Málaga (España)**, **París (Francia)** y **Berlín (Alemania)**.

5.3.1. Málaga (España)

Málaga tiene un clima suave, lo que favorece el uso de bombas de calor (aeroterminia) para climatización y ACS. En los últimos años la aeroterminia se ha popularizado en España gracias a su eficiencia energética y ayudas públicas, incluso en regiones cálidas como Andalucía. La **microcogeneración doméstica** con pila de combustible es prácticamente inexistente en el mercado residencial español; se considera una tecnología emergente (“lo último que llega a nuestros hogares”) y su adopción es testimonial. A falta de equipos tipo Enefarm comerciales en España, la microgeneración suele referirse a sistemas de cogeneración con motor Stirling o de combustión interna, cuyos costes también son elevados para uso residencial.

Costes en Málaga: Para una vivienda unifamiliar media, instalar una **bomba de calor aire-agua** completa (climatización invierno/verano + ACS) supone en total alrededor de 8000€ a 12.000€ (equipos + mano de obra). Por ejemplo, un sistema aerotérmico para 100 m² a 120 m² ronda los 8800€ con instalación incluida. En Málaga ciudad el coste puede ser ligeramente superior al de otras provincias andaluzas (Sevilla desde 8200€) debido a la reciente alta demanda residencial. No se dispone de ofertas comerciales de microcogeneración por pila de combustible en hogares; en su lugar, un sistema micro-CHP de Stirling (externo) de 1 kW

térmico tiene un coste estimado de 8000 € a 10.000 € instalado, aunque apenas se instalan en viviendas. En la siguiente tabla se resumen los costes medios estimados:

Tecnología	Coste medio del sistema	Coste medio de instalación
Bomba de calor (aeroterminia, aire-agua)	6000 --8000 € (equipo)	2000 --4000 € (obra/adecuación)
Microgeneración (pila de combustible)	No disponible comercialmente (20.000 € estimado)	No disponible (5000 € a 7000 € estimado)

Fuentes: [66, 67, 68]. **Nota:** En Málaga la disponibilidad de bombas de calor es alta (muchos instaladores locales), mientras que la microgeneración tipo Enefarm no está implantada en el mercado residencial.

5.3.2. París (Francia)

En Francia, las bombas de calor aire-agua se promueven activamente (subvenciones *Ma-PrimeRénov*, IVA reducido, etc.), por lo que su adopción ha crecido en viviendas individuales incluso en climas templados como el de París. El coste típico de una **PAC (pompe à chaleur) air-eau** instalada en una casa estándar (110 m²) se sitúa entre 12.000 € a 16.000 € todo incluido, con un precio medio alrededor de 13.000 €. Desglosando, esto corresponde aproximadamente a 8000 € a 10.000 € por el equipo y 4000 € a 6000 € en instalación y adaptaciones (radiadores, depósito, etc.).

Por otro lado, la microgeneración doméstica en Francia está poco desarrollada. Existen calderas de microgeneración con motor Stirling **gas** (1 kW_e/6 kW_t) cuyo coste con instalación se estima en 12.000 € a 20.000 €. La tecnología Enefarm (pila de combustible) aún es experimental en Francia y requiere usarse junto con una caldera de gas convencional, pues por sí sola no cubre la calefacción de una casa típica. Su inversión inicial es incluso mayor que la de Stirling, por lo que prácticamente no hay adopción residencial fuera de proyectos piloto.

Costes en París:

Tecnología	Coste medio del sistema	Coste medio de instalación
Bomba de calor (aire-agua)	9000 € (equipo)	4000 € (instalación completa)
Microgeneración (Stirling, gas)	15.000 € (equipo + caldera)	3000 € (instalación)

Fuentes: [69, 70, 71]. **Comentarios:** En París la bomba de calor es cada vez más común en rehabilitaciones de calefacción (apoyada por ayudas estatales). En cambio, la microcogeneración doméstica tiene disponibilidad muy limitada; las pocas instalaciones se centran en calderas de microcogeneración a gas (Stirling), y la opción de pila de combustible no se espera comercialmente a corto plazo.

5.3.3. Berlín (Alemania)

Alemania impulsa fuertemente las bombas de calor para descarbonizar la calefacción (la ley 2024 exige 65 % energías renovables en sistemas nuevos). Berlín (clima frío) está viendo un rápido aumento en instalaciones de bomba de calor aire-agua, apoyadas por subvenciones federales (hasta 70 % del coste). Sin ayudas, el coste de una **Wärmepumpe** aire-agua típica en un unifamiliar alemán es más alto que en Francia: 15.000 € a 30.000 € total, dependiendo del tipo (las geotérmicas y agua-agua están en el rango alto). Un desglose medio para una bomba de calor aire-agua estándar sería 10.000 € a 15.000 € el equipo y 3000 € a 5000 € la instalación (circuitos, mano de obra).

Por otro lado, Alemania ha liderado en Europa la adopción de **microcogeneración por pila de combustible** (*Brennstoffzellen-Heizung*): programas como KfW 433 subvencionaron miles de unidades en viviendas. Aun así, su coste sigue siendo muy elevado: la unidad de pila de combustible más caldera auxiliar y depósito supone 20.000 € a 25.000 € de inversión en equipos, a lo que se suman 5000 € a 10.000 € en instalación (almacenamiento, integración al circuito, conexión gas). El coste total típico en Alemania alcanza 30.000 € a 35.000 € antes de subvenciones. Gracias a subsidios, Alemania contaba ya en 2017 con unas 1.500 microfuel cells domésticas operativas (comparado con >200.000 en Japón), concentradas en regiones como Renania del Norte-W. y Baviera. Pese a ese apoyo, en 2024 dejó de incentivarse si usan gas natural puro (se exige alimentarlas con hidrógeno verde, biometano u otro gas neutro en carbono), lo que puede frenar su adopción futura.

Costes en Berlín:

Tecnología	Coste medio del sistema	Coste medio de instalación
Bomba de calor (aire-agua)	12.000 € (equipo)	4000 € (instalación)
Microgeneración (pila combustible)	22.000 € (sistema fuel-cell)	8000 € (instalación e integración)

Fuentes: [72, 73, 74]. **Notas:** En Berlín, instalar una bomba de calor es viable y común (muchos instaladores certificados, ayudas estatales disponibles). La microgeneración por pila de combustible está disponible a través de fabricantes (Viessmann Vitocalor, Bosch Buderus, etc.), pero su adopción es muy limitada por el coste, enfocada a proyectos puntuales y viviendas de alto consumo donde las ayudas la hacen rentable. Las políticas alemanas actuales se orientan más hacia bombas de calor y energías 100 % renovables, por lo que el futuro de la microgeneración a gas está en revisión.

5.3.4. Síntesis

Del análisis de costes iniciales en las tres ciudades europeas consideradas se concluyen varios puntos clave. En primer lugar, la tecnología de **bomba de calor aire-agua** presenta una disponibilidad comercial generalizada y costes moderados en todos los casos, aunque con diferencias importantes: Málaga destaca como la opción más asequible (8000 € a 12.000 €), seguida de París (12.000 € a 16.000 €) y finalmente Berlín, donde los costes son más elevados (15.000 € a 19.000 €) incluso para sistemas estándar, debido al clima frío y mayores requisitos técnicos.

En contraste, la **microgeneración mediante pila de combustible** (tipo Enefarm o equivalentes) muestra una **baja penetración comercial** y un **coste inicial muy superior**, especialmente en Málaga (sin disponibilidad efectiva) y París (uso testimonial). Solo en Berlín se encuentra cierta adopción, apoyada por subsidios públicos previos, aunque su coste sin ayudas es elevado (30.000 € a 35.000 €) y su futuro incierto por las nuevas exigencias de descarbonización del gas.

En resumen, la **bomba de calor** se consolida como una tecnología madura, viable y competitiva en los tres contextos analizados, siendo especialmente rentable en climas suaves como el de Málaga. Por el contrario, la **microgeneración por pila de combustible**, aunque técnicamente avanzada, sigue teniendo una **barrera de entrada económica muy alta** y una **implantación marginal**, lo que limita su adopción como solución doméstica generalizada en el corto plazo.

5.4. Evaluación del desempeño energético y ambiental

Para evaluar el desempeño energético y ambiental de los sistemas analizados, se han considerado los factores de conversión energética y emisiones de dióxido de carbono, así como el precio medio de la electricidad residencial en cada país seleccionado (Francia, Alemania y España).

Los valores adoptados se resumen a continuación:

■ **Francia**

- Factor de emisión de CO₂: 0,027 kg CO₂/kWh [76]
- Factor de conversión a energía primaria: 2,58 kWh_{prim}/kWh_{final} [77]
- Precio de la electricidad: 0,29 €/kWh [78]

■ **Alemania**

- Factor de emisión de CO₂: 0,38 kg CO₂/kWh [79]
- Factor de conversión a energía primaria: 1,8 kWh_{prim}/kWh_{final} [80]
- Precio de la electricidad: 0,39 €/kWh [81]

■ **España**

- Factor de emisión de CO₂: 0,331 kg CO₂/kWh [82]
- Factor de conversión a energía primaria: 2,4 kWh_{prim}/kWh_{final} [83]
- Precio de la electricidad: 0,16 €/kWh [84]

Estos parámetros permiten cuantificar, a partir del consumo eléctrico de cada sistema, las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo equivalente de energía primaria y los costes operativos, facilitando así una comparación coherente entre escenarios climáticos y tecnologías energéticas.

5.4.1. Emisiones de CO₂

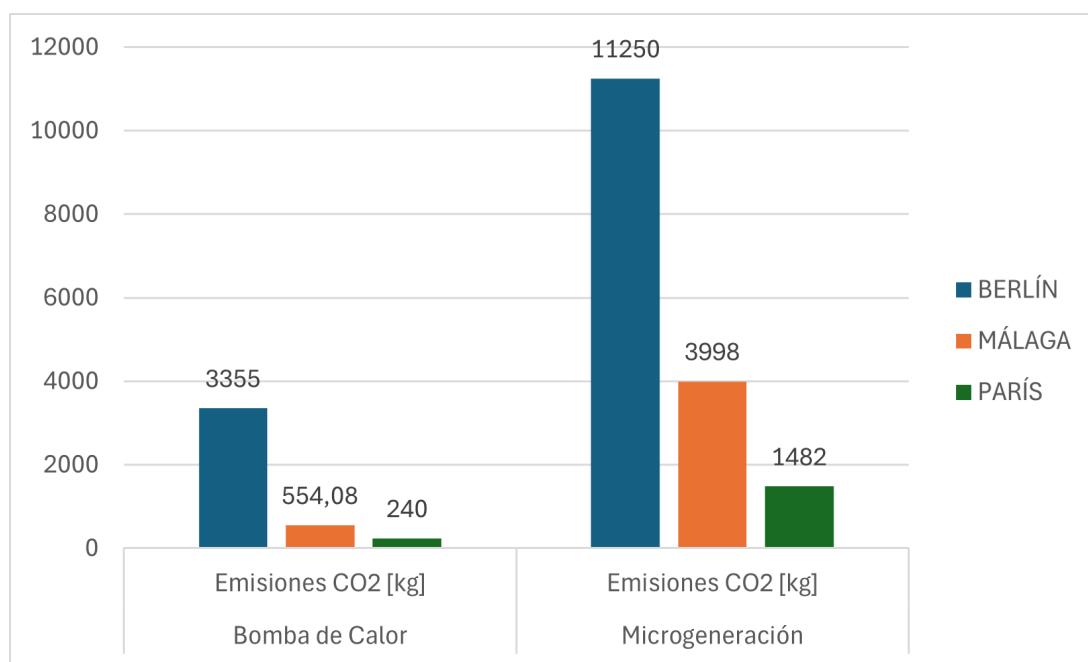


Figura 5.8. Emisiones durante el periodo de simulación de CO₂ (en kilogramos) para bomba de calor (BC) vs. microgeneración (MG) en Berlín (azul), Málaga (naranja) y París (verde).

En la Figura 5.8 se observan las *emisiones de CO₂* para bomba de calor (BC) y microgeneración (MG) en Berlín, Málaga y París. En todos los casos, la **bomba de calor** logra reducir drásticamente las emisiones respecto a la **microgeneración**. Se observa que en Berlín la BC emite en el orden de ~ 3000 kg CO₂, muy por debajo de los ~ 10000 kg CO₂ de la MG. La diferencia es aún más pronunciada en climas templados: en Málaga, la BC apenas alcanza unos pocos centenares de kg de CO₂ (debido a su alta eficiencia y baja demanda térmica), mientras que la MG supera ~ 4000 kg. En París, la BC prácticamente **elimina** las emisiones (barra verde casi nula) gracias a la electricidad de red de muy bajo carbono, frente a ~ 2000 kg CO₂ de la MG alimentada con gas. En suma, **BC produce muchas menos emisiones de GEI** que la MG en las tres ciudades analizadas, con brechas que van de aproximadamente 3 veces menos (Berlín) hasta más de 10 veces menos (Málaga y París).

Las causas de estos patrones se relacionan con el *mix* eléctrico y la eficiencia. La bomba de calor no genera emisiones directas in situ y aprovecha la creciente descarbonización de la electricidad. Por ejemplo, en España una bomba de calor típica emite alrededor de 54 g CO₂/kWh de calor útil frente a 204 g CO₂/kWh de una caldera de gas, es decir, **cuatro veces menos CO₂** por unidad de calor entregado. En Francia esta ventaja es extrema: la electricidad es prácticamente libre de carbono (~ 6 g CO₂/kWh generados en 2024 gracias a la

energía nuclear y renovable), por lo que la BC en París tiene emisiones casi nulas. En cambio, la microgeneración quema gas natural in situ, emitiendo CO₂ a razón de ~ 200 g/kWh térmico independientemente de la limpieza de la red eléctrica. Esto explica por qué en París la MG, aun siendo eficiente en términos energéticos, resulta más *contaminante* que la BC: está utilizando un combustible fósil en un contexto donde la electricidad es limpia. En Berlín, si bien la red eléctrica tiene más carbono que la francesa, la BC sigue siendo mucho más limpia que la MG porque su alto rendimiento (COP) reduce la demanda de electricidad y, por tanto, de emisiones. Además, la red alemana (y europea en general) aunque no tan limpia como la francesa, se está descarbonizando (intensidad promedio ~ 242 g CO₂/kWh en la UE para 2023) y con un COP $\geq 2-3$ la BC consigue emisiones por calor entregado inferiores a las de quemar gas directamente. En Málaga, con una red eléctrica española intermedia ($\sim 250-270$ g CO₂/kWh en 2020–22) y un clima cálido que exige poca energía de calefacción, la huella de carbono de la BC es bajísima, mientras que la MG mantiene un mínimo de emisiones por la combustión de gas necesaria para cubrir la demanda térmica y posiblemente el agua caliente. Con todo, los resultados reflejan que la tecnología de bomba de calor permite reducciones de CO₂ muy significativas en comparación con sistemas de gas en los tres entornos estudiados, alineándose con los objetivos de descarbonización (la UE busca un 55 % menos de emisiones al 2030 respecto a 1990).

5.4.2. Consumo de Energía Primaria

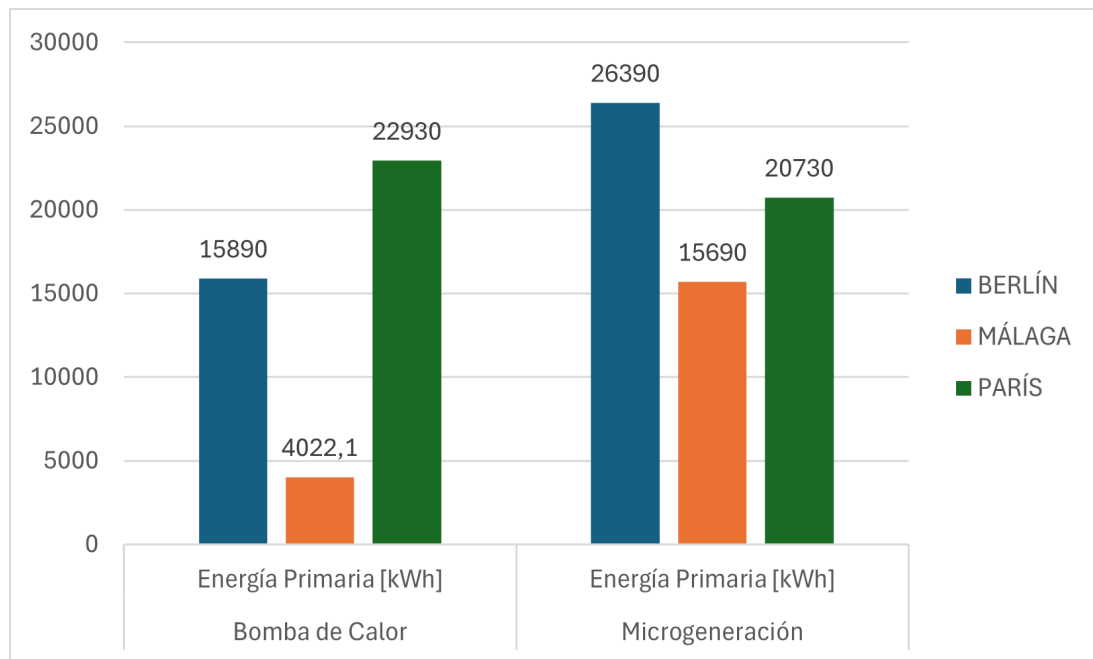


Figura 5.9. Consumo durante el periodo de simulación de energía primaria (en kWh) para bomba de calor (BC) y microgeneración (MG) en Berlín (azul), Málaga (naranja) y París (verde).

En la Figura 5.9 se muestra el *consumo de energía primaria (en kWh)* de BC vs. MG en Berlín, Málaga y París. Aquí apreciamos diferencias más matizadas entre las dos tecnologías según la ciudad. En **Berlín**, la bomba de calor consume alrededor de 15 000 kWh de energía primaria, sustancialmente **menos** que la microgeneración (que ronda los 25 000 kWh). De igual forma, en **Málaga** la BC muestra un consumo primario muy bajo ($\sim 4\,000$ kWh) frente a los $\sim 15\,000$ kWh de la MG; la BC requiere alrededor de una cuarta parte de la energía primaria que la MG, evidenciando su superior eficiencia en climas cálidos. Sin embargo, el patrón se invierte parcialmente en **París**: la BC demanda en torno a 22 000 kWh de energía primaria, *ligeramente más* que la MG (que consume cerca de 20 000 kWh). Es decir, **en París la microgeneración resulta más eficiente energéticamente** en términos de energía primaria consumida, a diferencia de los otros casos donde la BC es claramente superior.

Estas diferencias se explican considerando la eficiencia intrínseca de cada sistema y cómo se contabiliza la *energía primaria*. La **bomba de calor** aprovecha energía ambiental gratuita (aire) y entrega más calor útil que la energía eléctrica que consume; su Coeficiente de Rendimiento (COP) suele rondar 3–4 en climas templados, lo que significa que por cada 1 kWh de electricidad puede aportar $\sim 3\text{--}4$ kWh térmicos. En Málaga, con clima benigno, el COP es muy alto y las

necesidades de calefacción son bajas, de modo que la energía primaria requerida (electricidad de red) es mínima. En Berlín, el clima frío reduce la eficiencia estacional de la BC (en invierno el COP puede caer, ya que **las bombas de calor funcionan menos eficientemente en entornos fríos**), pero aun así el ahorro respecto a quemar combustibles es notable.

Ahora bien, la contabilización de *energía primaria* penaliza la electricidad debido a las pérdidas en generación y transporte: típicamente se multiplica la electricidad final por un coeficiente (>2) para reflejar la energía primaria consumida en la central eléctrica. Por tanto, incluso con COP altos, la BC carga con la ineficiencia de la generación eléctrica *upstream*. **En Francia**, donde la electricidad proviene mayormente de nuclear, las pérdidas termodinámicas de las centrales elevan la energía primaria calculada: aunque la electricidad sea limpia en CO_2 , producirla implicó consumir energía primaria (por ejemplo, 3 kWh térmicos de nuclear para obtener ~ 1 kWh eléctrico útil, según eficiencia $\sim 33\%$). En cambio, la **microgeneración (cogeneración)** quema gas in situ con un aprovechamiento total muy elevado: típicamente convierte $\sim 90\%$ de la energía del gas en energía útil combinada (calor + electricidad). El fundamento de esta alta eficiencia es que se utiliza el calor que en una planta eléctrica convencional sería desperdiciado. De este modo, **la MG en París logra un consumo algo menor de energía primaria** porque cada unidad de gas se transforma casi íntegramente en calor para el edificio y en electricidad (aliviando requerimientos de la red).

En otras palabras, la cogeneración está ahorrando energía a nivel del sistema al evitar pérdidas de generación centralizada. Este resultado –MG más eficiente energéticamente que BC en París– **no contradice** la superior eficiencia técnica de la bomba de calor, sino que demuestra la sensibilidad de la métrica de *energía primaria* al mix energético y a cómo se contabiliza la electricidad. En Berlín y Málaga, la situación es la opuesta: la energía primaria consumida por la BC es muy inferior a la de la MG, porque allí el aporte de la aerotermia (energía ambiental) y las ventajas del COP superan con creces las pérdidas en generación eléctrica. Además, en climas de baja demanda como Málaga, la microgeneración puede no operarse el número de horas suficiente a plena carga, desaprovechando su potencial de ahorro de primaria (una MG típica requiere muchas horas de funcionamiento anual para maximizar su rendimiento y rentabilidad).

En resumen, *energéticamente* la BC suele ser más eficiente, salvo en contextos particulares como París donde la forma de computar la primaria favorece a la cogeneración. Esto subraya la importancia de analizar ambas métricas (energía vs. emisiones), ya que un menor consumo de primaria no siempre implica menor impacto ambiental si el vector energético es distinto.

5.4.3. Costes Operativos

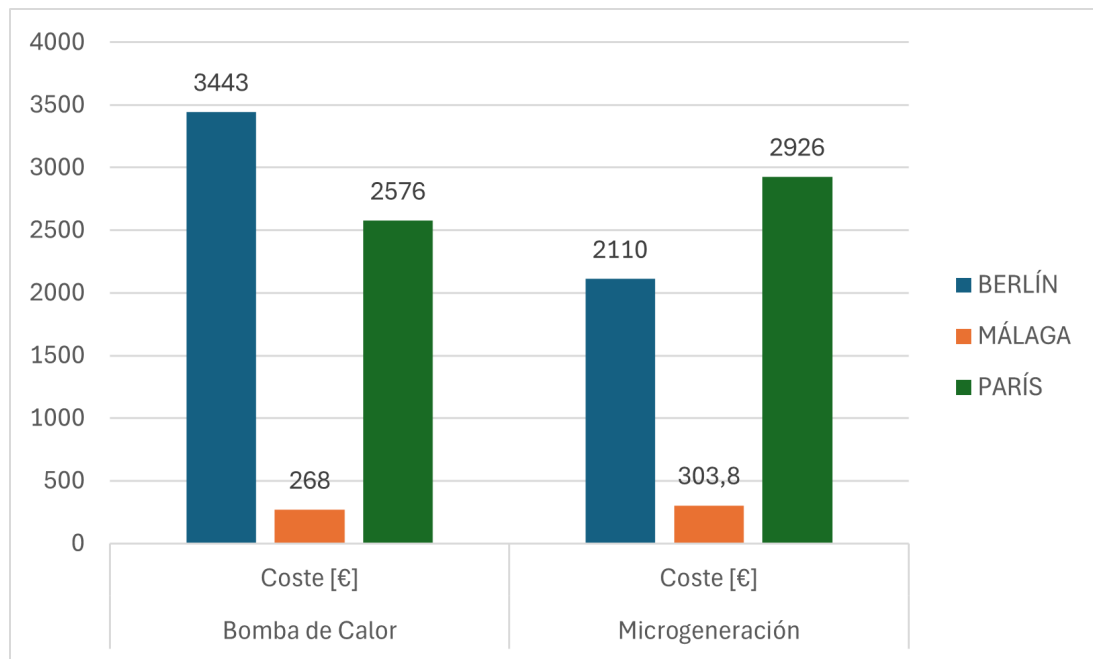


Figura 5.10. Costes operativos durante el periodo de simulación (en euros) de bomba de calor (BC) y microgeneración (MG) en Berlín (azul), Málaga (naranja) y París (verde).

En la Figura 5.10 se representa el *coste operativo* de BC vs. MG en Berlín, Málaga y París. A diferencia de las emisiones y la energía, en los costes vemos **tendencias cruzadas** dependiendo de la ciudad. En **Berlín**, la bomba de calor incurre en el coste más alto (~ 3.4 k€), mientras que la microgeneración resulta bastante más económica (~ 2.0 k€). Es decir, **en clima frío la MG ahorra costes respecto a la BC**, pese a consumir más energía y emitir más CO₂. Por el contrario, en **Málaga** la situación se invierte: la BC presenta un coste muy bajo (del orden de sólo 0.2–0.3 k€, dado el escaso consumo eléctrico requerido en clima cálido), mientras que la MG ronda ~ 0.4 k€. Aquí la **bomba de calor es más barata de operar**. En **París**, ambos sistemas tienen costes similares en torno a 2.5–2.8 k€, con una ligera ventaja para la MG. Podemos resumir que **la MG es económicamente competitiva o superior en climas fríos (Berlín) y ligeramente en París, mientras que la BC domina en climas cálidos (Málaga)**. Los costes convergen en el caso intermedio (París), reflejando un equilibrio de factores.

Las razones detrás de estos costes deben entenderse considerando tanto la eficiencia energética *como* los precios locales de la electricidad y el gas. En Berlín (y Alemania en general) el precio de la electricidad es muy elevado en comparación con el gas natural. Esto significa que, aunque la bomba de calor use menos energía final, pagar esa electricidad puede costar más que

pagar el gas para la microgeneración. De hecho, es un patrón común: una BC puede reducir en $\sim 66\%$ la demanda de energía respecto a una caldera de gas, pero el ahorro económico puede ser menor (p. ej. $\sim 45\%$) debido al mayor precio del kWh eléctrico. En el caso berlinés, la electricidad podría costar onerosamente (ej. $>0,30$ €/kWh), por lo que incluso con un COP de 3, el coste por kWh térmico de la BC acaba siendo comparable o superior al del gas (si el gas cuesta $\sim 0,08$ – $0,10$ €/kWh, una caldera o MG entrega calor a $\sim 0,09$ – $0,12$ €/kWh térmico, mientras que la BC a COP 3 tendría un coste $\sim 0,10$ €/kWh térmico con electricidad a $0,30$ €). Así, **el diferencial de precios energéticos en Alemania favorece a la MG** en gasto operativo, pese a su menor eficiencia global. Además, la microgeneración produce parte de la electricidad del edificio internamente; en Berlín esto ahorra comprar esa electricidad a la red a precio *retail* alto, mejorando la economía de la MG.

En **Málaga**, por otro lado, las circunstancias hacen que la BC sea más barata: primero, la demanda de calefacción es muy baja, con lo cual la factura absoluta de cualquiera de los sistemas es pequeña. Segundo, la BC cubre esa demanda con muy pocos kWh eléctricos gracias a COP altos y, potencialmente, también atiende la **refrigeración** en verano. Este último punto es importante: una bomba de calor puede climatizar en modo frío en verano con la misma máquina, algo especialmente útil en climas cálidos. Si en el análisis se consideró la climatización completa, la BC en Málaga estaría cubriendo también el aire acondicionado de forma eficiente, mientras que la solución con MG habría necesitado recurrir a un equipo de aire acondicionado convencional (incrementando el consumo eléctrico de la MG en verano). Esto podría explicar por qué la MG en Málaga muestra un coste operativo mayor: además del gas para calefacción, debe añadirse el coste eléctrico de la refrigeración veraniega, que la BC resuelve más eficientemente integrada en un solo sistema.

En **París**, el precio de la electricidad es moderado (gracias al nuclear) y el del gas también relativamente bajo, con impuestos y tarifas diferentes a los alemanes. Allí, la BC sí consume más energía primaria que la MG (como vimos), lo que se traduce en un consumo eléctrico mayor y, por ende, un coste algo más alto que el de la MG – pero las diferencias no son pronunciadas. La MG parisina se beneficia de producir electricidad local que evita comprar parte de la energía de la red, logrando un coste apenas inferior al de la BC.

En síntesis, **los costes operativos dependen fuertemente de la relación de precios entre electricidad y gas**: donde la electricidad es cara respecto al gas (Berlín), las tecnologías a gas como MG mantienen ventaja económica a pesar de su menor eficiencia; donde la electricidad es relativamente asequible o la demanda de calor es baja (Málaga), la alta eficiencia de la bomba de calor se traduce en facturas más reducidas. Conviene destacar que las políticas energéticas pueden alterar estas dinámicas (por ejemplo, gravando más las emisiones de CO₂

del gas o subvencionando la electricidad verde), pero con los precios actuales representativos, los resultados obtenidos reflejan esas realidades locales.

5.4.4. Síntesis

Analizando conjuntamente **eficiencia, emisiones y costes**, se revelan **patrones coherentes pero también algunas contradicciones** interesantes. En líneas generales, la bomba de calor demuestra ser la opción más eficiente en uso de la energía y la más limpia en cuanto a emisiones, mientras que la microgeneración puede ser más económica en ciertos contextos.

En **Málaga**, los tres criterios apuntan en la misma dirección: la BC es más eficiente, emite mucho menos CO₂ y cuesta menos operar. Este caso ideal muestra cómo en climas benignos la tecnología más sustentable también resulta la más rentable, dado que aquí no hay prácticamente *trade-offs*.

En **Berlín**, en cambio, observamos un desacople entre criterios: la BC gana en eficiencia energética (menor kWh primario) y en sostenibilidad (menor CO₂), pero la MG gana en costo operativo. Es decir, en clima frío con energía eléctrica costosa, el sistema más eficiente y ecológico (BC) no es el más barato para el usuario – un **conflicto típico entre objetivos medioambientales y económicos** cuando el precio de la energía no internaliza el coste del carbono.

Por último, **París** presenta el escenario inverso al de Berlín en términos de eficiencia vs. emisiones: allí la microgeneración es ligeramente más eficiente (consume menos energía primaria), pero aun así emite bastante más CO₂ que la bomba de calor. Esta aparente *paradoja* parisina –MG eficiente pero sucia, BC menos eficiente pero limpia– se explica, como vimos, por la combinación de un mix eléctrico ultra-descarbonizado y la manera en que medimos la “eficiencia” primaria. Demuestra que **un rendimiento energético elevado no siempre equivale a bajas emisiones**, si dicho rendimiento se logra usando un combustible fósil en lugar de electricidad limpia. Asimismo, en París la MG tuvo un pequeño beneficio económico frente a la BC, lo que indica otra disociación: *más eficiencia primaria no significó menos CO₂, pero sí ayudó ligeramente al bolsillo* (debido a ahorrar compras de electricidad de red).

En síntesis, **no siempre los tres ejes –eficiencia, emisiones, economía– apuntan en la misma dirección**; las ventajas de cada tecnología dependen fuertemente del contexto climático y del contexto energético (mix y precios).

Desde una perspectiva técnica, estos resultados son **consistentes con los principios ter-**

modinámicos y económicos de cada sistema. La bomba de calor exhibe altas eficiencias de conversión (aprovecha energía renovable del ambiente) y sintoniza con la tendencia de electrificación limpia: incluso donde la red eléctrica no es perfecta, a medida que ésta incorpore más renovables, las emisiones asociadas a las BC seguirán disminuyendo. La microgeneración, por su parte, maximiza el aprovechamiento del gas natural ofreciendo calor y electricidad simultáneamente, lo cual en escenarios de redes eléctricas carbonizadas podía reducir tanto emisiones como consumos de primaria. Sin embargo, en el contexto europeo actual y futuro –comprometido con la descarbonización– su beneficio ambiental es dudoso: queda patente que en una ciudad con electricidad casi libre de carbono (París), un motor de gas por muy eficiente que sea **sigue emitiendo CO₂ en cantidades significativas**.

En términos de **coherencia entre métricas**, cabe destacar que allí donde la BC es más eficiente (p. ej. Málaga con COP altos) *también* resultó más limpia y barata, lo cual refuerza la **viabilidad integral de las bombas de calor en climas cálidos**. En climas fríos como Berlín, la BC mantiene su superioridad energética y ambiental, pero requiere apoyo económico o políticas (p. ej. tarifas eléctricas favorables, impuestos al carbono en el gas, subsidios a la electrificación) para superar la barrera del coste operativo más alto – de lo contrario, usuarios podrían preferir opciones a gas más baratas a corto plazo pese al perjuicio ambiental. Por otro lado, la microgeneración podría encontrar nicho donde se valoren sus aportes de fiabilidad o aprovechamiento de calor constante, pero sus resultados sugieren que **sólo sería competitiva en eficiencia/costo mientras la electricidad provenga parcialmente de fósiles y sea cara**. A medida que estas condiciones cambian (electricidad más limpia y eventualmente más barata con expansiones renovables), las ventajas comparativas de la MG se erosionan.

En conclusión, los gráficos comparativos permiten extraer varias conclusiones técnicas sólidas:

1. **Clima:** El clima influye enormemente en el desempeño – las BC brillan en climas templados/cálidos con altísimos COP, mientras que las MG sufren por falta de horas de operación o demandas menores; en climas fríos las BC pierden algo de eficiencia pero siguen siendo competitivas energéticamente.
2. **Mix energético:** Un mix eléctrico limpio multiplica el beneficio climático de las BC, haciendo que incluso con leves penalizaciones en energía primaria, sigan siendo la mejor opción ambiental (caso de París). Por el contrario, si la electricidad es sucia, el margen de reducción de CO₂ de las BC se acorta; pero dado el rumbo europeo de eliminar carbón y gas de la generación, el panorama favorece cada vez más a las bombas de calor en términos de emisiones.

3. **Eficiencia vs. emisiones:** La alta eficiencia de la cogeneración en términos de energía primaria no garantiza bajas emisiones si sustituye a una red limpia por combustión in situ. La métrica de eficiencia debe por tanto complementarse con la de emisiones para evaluar tecnologías en un contexto de transición energética.
4. **Costes y políticas:** Los costes operativos actualmente reflejan las estructuras de precios actuales – que en algunos países no están totalmente alineadas con la eficiencia energética ni con las emisiones. La rentabilidad de una BC vs. una MG puede invertirse por factores exógenos (tarifas, impuestos), pero es esperable que con políticas climáticas (precio al carbono, incentivos a electrificación) la balanza económica se incline a favor de las opciones de menor carbono.

En definitiva, **la bomba de calor emerge como la opción más acorde con la descarbonización de la edificación**, proporcionando eficiencia energética y reducción drástica de CO₂, mientras que la microgeneración de gas, aunque técnicamente eficiente y a veces económica, presenta emisiones inherentes que la hacen menos coherente con los objetivos climáticos actuales. Los resultados comparativos en Berlín, Málaga y París ilustran de forma concreta estos puntos, ofreciendo una visión clara de cómo factores geográficos y energéticos condicionan el desempeño de cada tecnología. Esta discusión, por tanto, sustenta con datos cuantitativos la recomendación de impulsar bombas de calor (sobre todo en entornos con electricidad verde) como solución de climatización sostenible, a la vez que señala las situaciones donde aún existen desafíos (p. ej. costes en climas fríos) que deberán abordarse para lograr una transición energética equilibrada en el sector residencial.

5.5. Estimación del periodo de amortización del sistema de micro-cogeneración

Con el fin de complementar la discusión de resultados, se ha llevado a cabo un cálculo preliminar de la amortización (*payback*) del sistema de micro-cogeneración (MG) frente a la bomba de calor (BdC). La estimación se basa únicamente en los costes de inversión inicial y en los costes operativos anuales durante el periodo de calefacción. La contribución del modo de refrigeración, así como posibles ahorros derivados de la autogeneración eléctrica fuera de temporada, se consideran *a priori* despreciables en esta primera aproximación.

5.5.1. Hipótesis de partida

- **Escenario con ventaja operativa.** De acuerdo con los resultados expuestos, sólo en Berlín el coste operativo anual del sistema MG es inferior al de la BdC. En París y Málaga la BdC presenta tanto menor inversión inicial como menores costes operativos, por lo que la MG no llega a amortizarse dentro de su vida útil prevista. El análisis se centra, por tanto, en el caso de Berlín, aunque es extensible a cualquier emplazamiento donde se cumpla la condición $\Delta C_{op} < 0$.

- **Diferencia de inversión inicial:**

$$\Delta C_{inv} = C_{inv,MG} - C_{inv,BdC} = 30.000 \text{ €} - 16.000 \text{ €} = 14.000 \text{ €}$$

- **Diferencia de costes operativos anuales** (período de calefacción):

$$\Delta C_{op} = C_{op,MG} - C_{op,BdC} = 2110 \text{ €} - 34.432 \text{ €} = -1333 \text{ €}$$

El signo negativo indica un ahorro anual de 1333 € a favor de la MG.

Cálculo del periodo simple de retorno (*Simple Payback Period, SPP*) El periodo simple de retorno se define como la razón entre la sobre-inversión inicial y el ahorro neto anual:

$$SPP = \frac{\Delta C_{inv}}{|\Delta C_{op}|} = \frac{14.000 \text{ €}}{1333 \text{ € a}^{-1}} \approx 10,5 \text{ a} \implies \boxed{SPP \simeq 11 \text{ años}} \quad (5.3)$$

Discusión

1. **Viabilidad económica.** Bajo las condiciones actuales de Berlín, la MG alcanza el punto de equilibrio en torno al undécimo año de operación. A partir de ese momento el sistema resulta más rentable que la BdC en términos netos.
2. **Sensibilidad.** El SPP mostrado es muy sensible a la evolución del precio relativo entre electricidad y gas, a los costes de mantenimiento y a la posible valorización de los excedentes eléctricos autogenerados. Una reducción del ahorro anual del 20 % incrementaría el SPP hasta 13 años; por el contrario, incentivos a la inversión (p. ej. subvención del 30 %) lo reducirían por debajo de 8 años.
3. **Limitaciones.** El análisis no contempla:

- el eventual ahorro en refrigeración cuando la BdC opera en modo frío;
- la depreciación ni el coste de capital (VAN, TIR);
- la evolución proyectada de los costes de combustible ni posibles impuestos al CO₂.

Estos aspectos deberían incluirse en estudios financieros detallados.

4. **Generalización.** El procedimiento descrito es aplicable a cualquier ubicación donde se verifique $\Delta C_{op} < 0$, proporcionando una primera estimación rápida de la velocidad de amortización del sistema de micro-cogeneración.

En síntesis, aun cuando la MG sólo muestra ventaja operativa en entornos climáticos fríos como el de Berlín, el horizonte de amortización obtenido (10 años a 11 años) la posiciona como una alternativa económicamente competitiva siempre que las diferencias de coste operativo se mantengan estables a lo largo del ciclo de vida del equipo.

6 | Conclusiones

Este trabajo ha comparado el desempeño energético, económico y ambiental de dos tecnologías de calefacción residencial —bomba de calor aire-agua y micro-cogeneración basada en pila de combustible— mediante simulaciones dinámicas en *TRNSYS*. El objetivo general, valorar la viabilidad de la micro-cogeneración como alternativa o complemento a la bomba de calor en el marco del Pacto Verde Europeo, se ha alcanzado: se han modelado y parametrizado ambos sistemas, se han aplicado a una vivienda tipo en tres climas representativos (Málaga, París y Berlín) y se han analizado indicadores de rendimiento, confort, emisiones y costes.

No obstante, a la luz de los resultados obtenidos y de las limitaciones identificadas, conviene adoptar una visión crítica, especialmente respecto a la micro-cogeneración:

- **Fidelidad del modelo:** El modelo de pila de combustible empleado es estático y se duda de la reproducibilidad con detalle de la dinámica del sistema. Ello tiende a sobreestimar o subestimar la eficiencia eléctrica y, por extensión, el rendimiento global.
- **Emisiones de CO₂:** En los escenarios considerados, la micro-cogeneración emite entre un 10 % y un 25 % más CO₂ que la bomba de calor. El motivo principal es que la electricidad de la red europea ya contiene una elevada fracción renovable; desplazar kilovatios hora eléctricos por generación local a gas natural deja de ser ventajoso. Esta conclusión podría invertirse en países con *mix* eléctricos dominados por carbón o gas (p. ej. Polonia, Sudáfrica), donde el factor de emisión de la red es muy superior.
- **Dependencia del gas natural:** La tecnología comercial actual necesita gas natural de red; su atractivo ambiental mejoraría sensiblemente si dispusiera de un suministro continuo de hidrógeno bajo en carbono. La eventual aparición de una *hydrogen backbone* europea convertiría a la micro-cogeneración en una opción de bajas emisiones.
- **Independencia energética y resiliencia:** En Japón, los sistemas *ENE-FARM* se valoran por reforzar la autonomía doméstica frente a cortes de red. En la Unión Europea, donde la calidad del suministro es elevada, este beneficio es marginal; sin embargo, en áreas rurales o con redes débiles puede ser decisivo.
- **Costes:** La inversión inicial de la micro-cogeneración (8 000–10 000 €) duplica la de la bomba de calor equivalente. Sólo en viviendas con elevada demanda térmica y eléctrica,

o donde existan incentivos específicos al autoconsumo eléctrico, se alcanza un periodo de retorno competitivo.

6.1. Principales resultados

1. Las emisiones de CO₂ asociadas al uso de bomba de calor resultan notablemente inferiores en los tres climas simulados, debido a su alta eficiencia y al elevado contenido renovable del mix eléctrico europeo actual.
2. La micro-cogeneración mantiene su potencia útil a temperaturas exteriores bajas, lo que la hace más estable en Berlín; aun así, su ventaja no compensa las mayores emisiones cuando el *mix* eléctrico es renovable.
3. Ambos sistemas satisfacen los criterios de confort de la norma UNE-EN ISO 7730:2006 (categoría B), si bien la micro-cogeneración presenta menor dispersión térmica por la inercia de su depósito acumulador.
4. Económicamente, la bomba de calor arroja los menores costes operativos en los tres climas; la micro-cogeneración sólo mejora el VAN cuando el precio de la electricidad doméstica supera los 0,35 €/kWh y el del gas se mantiene por debajo de 0,08 €/kWh.

6.2. Conclusión general

Considerando las simulaciones realizadas y las incertidumbres señaladas, la bomba de calor aire-agua se perfila hoy como la opción más eficaz para la descarbonización del parque residencial europeo: combina alta eficiencia estacional, menor huella de carbono y costes competitivos. La micro-cogeneración conserva interés en escenarios muy concretos —climas fríos, *mix* eléctricos fósiles, demanda térmica elevada o necesidad de autosuficiencia— y podría ganar protagonismo si se despliega una red de hidrógeno verde y se perfeccionan los modelos y controles de los sistemas de pila de combustible.

6.3. Líneas futuras

- Desarrollar un modelo de pila de combustible que modele los procesos que verdaderamente se dan.

- Evaluar la sensibilidad de ambos sistemas a escenarios de precios futuros de gas, electricidad y CO₂.
- Analizar configuraciones híbridas (bomba de calor + micro-cogeneración) para maximizar la cobertura renovable y la resiliencia.
- Ampliar el estudio a países con *mix* eléctricos intensivos en carbón/gas y a la eventual disponibilidad de hidrógeno en red.

Bibliografía

- [1] European Commission. *Heat pumps*. Energy - European Commission, 2023. Disponible en: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heat-pumps_en
- [2] Comisión Europea. *El Pacto Verde Europeo: Trabajar para ser el primer continente climáticamente neutro*. Disponible en: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es
- [3] Comisión Europea. *REPowerEU: Affordable, secure and sustainable energy for Europe*. Disponible en: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
- [4] Comisión Europea. *Directiva sobre el rendimiento energético de los edificios (EPBD) - Revisión 2024*. Publicado el 17 de octubre de 2024. Disponible en: https://energy.ec.europa.eu/news/commission-issues-guidance-phasing-out-financing-stand-alone-fossil-fuel-boilers-2025-2024-10-17_en
- [5] El Confidencial. *La UE quiere instalar 30 millones de bombas de calor para 2030: los cinco beneficios que supondría para España*. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/economia/2024-04-25/union-europea-bombas-de-calor-espana-bra_3864516/
- [6] Zhang D., Li B., Zhao Q., Li J. *Thermal performance and energy characteristic analysis of multiple renewable energy complementary heat pump system*. Solar Energy, vol. 195, pp. 416–426, 2020. doi:10.1016/j.solener.2019.12.030.
- [7] International Energy Agency. *The Future of Heat Pumps*. IEA Report, 2022. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
- [8] European Union–Japan Centre for Industrial Cooperation. *Hydrogen and Fuel Cells in Japan*. 2019. Disponible en: https://www.eu-japan.eu/sites/default/files/publications/docs/hydrogen_and_fuel_cells_in_japan.pdf
- [9] J. Nyangon y A. Darekar. *Advancements in hydrogen energy systems: A review of levelized costs, financial incentives and technological innovations*. Innovation and Green Development, vol. 3, 2024, art. 100149.

- [10] Schneider, U.H. *Success factors for demonstration projects of small-scale stationary fuel cells in residential buildings*. E3S Web of Conferences, vol. 334, 2022. doi:10.1051/e3sconf/202233404007.
- [11] EcoHabitar. *Las bombas de calor alimentadas por hidrógeno podrían reducir la huella de carbono*. Disponible en: <https://ecohabitar.org/las-bombas-de-calor-alimentadas-por-hidrogeno-podrian-reducir-la-huella-de-carbono/>
- [12] Agencia Europea de Medio Ambiente. *Decarbonising heating and cooling — a climate imperative*. Publicado el 23 de febrero de 2023. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/decarbonisation-heating-and-cooling>
- [13] Comisión Europea. (s.f.). *Prioridades de la Comisión Europea 2019–2024*. Recuperado de https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024_es
- [14] Environmental Investigation Agency. *EIA calls for European policymakers to maximise potential of heat pumps in climate change fight*. Publicado en abril de 2025. Disponible en: <https://eia-international.org/news/eia-calls-for-european-policymakers-to-maximise-potential-of-heat-pumps-in-climate-change-fight/>
- [15] Comisión Europea, Centro Común de Investigación. *Residential heating: heat pumps would knock down energy consumption and emissions*. Publicado el 21 de junio de 2023. Disponible en: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/residential-heating-heat-pumps-would-knock-down-energy-consumption-and-emissions-2023-06-21_en
- [16] Eurostat. *Uso de renovables en calefacción y refrigeración en la UE en 2023*. 2025. Disponible en: <https://www.eseficiencia.es/2025/03/10/uso-renovables-calefaccion-refrigeracion-aumenta-ue-segun-datos-eurostat>
- [17] Euronews. *Desigualdad en el empleo de energías renovables para la calefacción en Europa*. 2025. Disponible en: <https://es.euronews.com/green/2025/04/05/desigualdad-en-el-empleo-de-energias-renovables-para-la-calefaccion-en-europa-estos-son-lo>
- [18] Agencia Europea de Medio Ambiente. *El impacto del cambio climático en el sistema energético europeo*. 2023. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/publications/the-impact-of-climate-change-on-the-european-energy-system-1>
- [19] Wikipedia. *Acumulación freática*. Última consulta: 2025. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Acumulaci%C3%B3n_fre%C3%A1tica

- [20] Comisión Europea. *Recomendación (UE) 2020/1563 de la Comisión de 14 de octubre de 2020 relativa a la pobreza energética*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 357, 27.10.2020, p. 35–38. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32020H1563>
- [21] Comisión Europea. *Acción climática y el Pacto Verde*. Disponible en: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/climate-action-and-green-deal_en
- [22] Comisión Europea. *Renovation Wave Strategy*. 2020. Disponible en: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en
- [23] AK Europa. *European Commission starts renovation wave*. Publicado el 23 de octubre de 2020. Disponible en: <https://www.akeuropa.eu/en/european-commission-starts-renovation-wave>
- [24] Wikipedia. *Fit for 55*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Fit_for_55
- [25] Agencia Internacional de la Energía. *Plan REPowerEU: acción conjunta europea sobre energía renovable y eficiencia energética*. Disponible en: <https://www.iea.org/policies/15691-repowereu-plan-joint-european-action-on-renewable-energy-and-energy-efficiency>
- [26] Comisión Europea. *Net-Zero Industry Act*. Disponible en: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_en
- [27] European Environment Agency. *EU achieves 20-20-20 climate targets, 55 % emissions cut by 2030 possible with additional measures*. 2021. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-achieves-20-20-20>
- [28] Agencia Europea de Medio Ambiente. (2024). *Tendencias totales de emisiones de gases de efecto invernadero*. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/total-greenhouse-gas-emission-trends>
- [29] European Environment Agency. *Total net greenhouse gas emission trends and projections in Europe*. 2024. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/total-greenhouse-gas-emission-trends>
- [30] European Commission. *European Climate Law*. 2021. Disponible en: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en

- [31] Comisión Europea. (2024). *Progreso en la acción climática*. Recuperado de https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/progress-climate-action_en
- [32] European Commission. *Progress on climate action*. 2024. Disponible en: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/progress-climate-action_en
- [33] European Commission. *REPowerEU Plan*. 2022. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131
- [34] ASHRAE. *2020 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.
- [35] Eurovent Certification. *Heat Pumps Certification Programme*. Disponible en: <https://www.eurovent-certification.com/en/third-party-certification/certification-programmes/eurovent-hp>
- [36] Caloryfrio.com. *Eficiencia energética de la bomba de calor aire-agua*. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/eficiencia-energetica-de-la-bomba-de-calor-aire-agua.html>. Consultado en mayo de 2025.
- [37] Cogenera Eficiente. *Cogeneración a través del uso de Celdas de Combustible*. Centro de Excelencia en Eficiencia Energética Edificio y Ciudad (CEV), 2021. Disponible en: <https://www.cogeneraeficiente.cl/wp-content/uploads/2021/03/Cogeneraci%C3%B3n-a-trav%C3%A9s-de-uso-de-Celdas-de-Combustible.pdf>
- [38] Richards, D. (2025, 1 de febrero). *Japan's Hydrogen Fuel Cell Revolution: Another Step Toward Carbon Neutrality*. Climate Scorecard. Recuperado de <https://www.climatescorecard.org/2025/02/japans-hydrogen-fuel-cell-revolution-another-step-toward-carbon-neutrality/>
- [39] Nagatsu, Y. (2019). Development and deployment of residential fuel cell systems in Japan: The case of ENE-FARM. *Energy Policy*, 132, 378–390. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.041>
- [40] Staffell, I., & Green, R. (2015). The cost of domestic fuel cell micro-CHP systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11964–11974. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.116>
- [41] Simader, G., & Vidovic, P. (2022). *Success factors for demonstration projects of small-scale stationary fuel cells in residential buildings*. E3S Web of Conferences, 334, 04007.

- https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2022/01/e3sconf_efc2022_04007.pdf
- [42] U.S. Environmental Protection Agency. (2015). *Catalog of CHP Technologies – Section 6. Technology Characterization – Fuel Cells*. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies_section_6._technology_characterization_-_fuel_cells.pdf
- [43] Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644.
- [44] Gobierno de España. (2019). Código Técnico de la Edificación (CTE). Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org>
- [45] CEIS - Centro de Ensayos, Innovación y Servicios. Datos climáticos de referencia para ensayos de eficiencia energética. Disponible en: <https://www.ceislab.com>
- [46] Climate-Data.org. Datos climáticos de ciudades europeas. Disponible en: <https://es.climate-data.org>
- [47] European Commission. (2022). Heating and Cooling Degree Days by Country. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [48] Nomad Season. Guías climáticas por ciudad. Disponible en: <https://nomadseason.com>
- [49] Statista. (2022). Cooling Degree Days in Southern Europe. Disponible en: <https://www.statista.com>
- [50] ASHRAE. (2021). Climate Zone Map – International. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Disponible en: <https://www.ashrae.org>
- [51] International Energy Agency (IEA). (2021). The Future of Cooling – Opportunities for energy-efficient air conditioning. Disponible en: <https://www.iea.org>
- [52] IPCC. (2021). Sixth Assessment Report – Mitigation of Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: <https://www.ipcc.ch>
- [53] Deutscher Wetterdienst (DWD). *Climate Data for Berlin*. TRY Files, Germany, 2021.
- [54] DWD. *Test Reference Years Germany (TRY)*, Version 2017. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- [55] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). *Resumen Climatológico: Málaga*, 2023.

- [56] Ministerio de Fomento. *Código Técnico de la Edificación (CTE): HE 1, Zonificación climática por provincia*. Gobierno de España, 2019.
- [57] Météo France. *Climat moyen à Paris (normales 1991–2020)*, 2023.
- [58] Eurostat. *Heating and Cooling Degree Days in the EU*, 2023.
- [59] CEN. *EN 14825:2018 - Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance*. Comité Européen de Normalisation, 2018.
- [60] Zühlsdorf, B., et al. “Performance of air-source heat pumps in cold climates: field measurements and modelling.” *Energy and Buildings*, vol. 174, 2018, pp. 72–84.
- [61] European Commission. *Regulation (EU) No 813/2013: Ecodesign Requirements for Space Heaters and Combination Heaters*, Brussels, 2013.
- [62] Dorer, V., and Weber, A. “Energy and CO₂ saving potential of micro-cogeneration systems in residential buildings.” *Energy and Buildings*, vol. 35, 2003, pp. 925–931.
- [63] Carbon Trust. *Micro-CHP Accelerator: Final Report on Field Trials*, UK, 2009.
- [64] Peel, M. C., et al. “Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification.” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 5, 2007, pp. 1633–1644.
- [65] European Parliament. *Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (recast)*, Official Journal of the European Union, 2010.
- [66] IDAE y Bosch Termotecnia, “Guía de aerotermia residencial 2024”, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, 2024.
- [67] Preciogas Málaga, “Presupuestos de instalaciones de aerotermia en Andalucía”, Málaga, consultado 2024.
- [68] Inarquia, “Estado de la microgeneración residencial en España”, 2023.
- [69] ADEME y Observ’ER, “Barómetro de renovables térmicas 2024”, París, 2024.
- [70] Agglomération de Compiègne, “Étude de coûts des PAC air-eau dans l’Oise”, 2023.
- [71] Saint-Gobain, “Micro-CHP Stirling pour maisons individuelles”, Dossier Técnico, 2023.
- [72] Enter AG, “Kostenübersicht Wärmepumpen 2024”, Berlín, 2024.

- [73] ADAC Deutschland, “Heizung mit Brennstoffzelle: Wirtschaftlichkeit und Förderungen”, 2024.
- [74] Thermondo GmbH, “Marktreport: Brennstoffzellen-Heizungen in Einfamilienhäusern”, Berlin, 2023.
- [75] Krosaki Harima Corporation, *Heat Insulating Refractories – Krosaki Harima*, disponible en: <https://www.krosaki.co.jp/sdgs-en/heat-insulating-en>.
- [76] Réseau de Transport d'Électricité (RTE). *Bilan Électrique 2024*.
- [77] Ministère de la Transition Écologique. *Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux*. Journal Officiel, France.
- [78] Eurostat. *Electricity prices for household consumers – bi-annual data (from 2007 onwards)*.
- [79] Umweltbundesamt (UBA). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Strommix 2023*.
- [80] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK). *Gebäudeenergiegesetz (GEG)*. Anexo 5: Umrechnungsfaktor Strom 1,8. 2020.
- [81] Eurostat. *Electricity prices for household consumers – bi-annual data (from 2007 onwards)*.
- [82] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Año 2023*.
- [83] MITECO. *Factores de conversión de energía final a primaria y emisiones. Sistema Eléctrico Peninsular 2023*.
- [84] Eurostat. *Electricity prices for household consumers – bi-annual data (from 2007 onwards)*.
- [85] Área Tecnología, *Bomba de calor: qué es, cómo funciona y tipos*, disponible en: <https://areatecnologia.com/calefaccion/bomba-de-calor.html>.
- [86] Wikimedia Commons, *CO2 emissions EU – Annual emissions from fossil fuels and industry*, disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CO2_emissions_EU.svg.
- [87] Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), *Decarbonising heating and cooling – a climate imperative*, 2023. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/decarbonisation-heating-and-cooling>.