



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

HACIA UNA VIVIENDA SOSTENIBLE: TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA EN CLIMATIZACIÓN PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES

Autor: D. José María González Sanz

Tutor: D. César Chamorro Camazón

Valladolid, marzo 2025

RESUMEN:

Optimizar el uso de la energía no solo es una necesidad técnica, sino también una responsabilidad ambiental. Por ello en este trabajo de fin de máster se realiza un recorrido por las tecnologías convencionales más comunes en el ámbito de la climatización de viviendas unifamiliares y por las tecnologías renovables más reconocidas y utilizadas.

Para demostrar sus beneficios se ha realizado un estudio de un caso básico realizando una rehabilitación energética de calefacción y ACS aportando tres soluciones distintas. Debido a la mentalidad del ciudadano común medio, pese a que cada vez hay más interés por preservar el medio ambiente, se requiere de un impacto sobre el bolsillo del individuo, por lo que se considera necesario demostrar el doble beneficio de este tipo de rehabilitaciones: el ahorro energético y el ahorro económico.

Se demuestra que el cambio hacia tecnologías renovables para este tipo de viviendas es, por tanto, una inversión rentable y beneficiosa para el medio ambiente.

PALABRAS CLAVE:

Eficiencia energética, tecnologías renovables, ahorro económico, huella de carbono, rehabilitación energética.

ABSTRACT:

Optimizing energy use is not only a technical necessity but also an environmental responsibility. This master's thesis explores the most common conventional technologies in the field of residential HVAC, as well as the most recognized and widely used renewable technologies.

To demonstrate their benefits, a case study has been conducted, focusing on an energy retrofit for heating and domestic hot water (DHW), proposing three different solutions. Given the mindset of the average citizen, and despite the growing interest in environmental preservation, financial impact remains a key factor. Therefore, it is essential to highlight the dual benefit of such retrofits: energy savings and economic savings.

It is demonstrated that the shift towards renewable technologies for this type of housing is, therefore, a profitable investment and beneficial for the environment.

KEYWORDS:

Energy efficiency, renewable technologies, economic savings, carbon footprint, energy retrofit.

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Justificación del estudio	1
1.2	Objetivos y alcance	2
1.3	Metodología y estructura del documento	3
2.	MARCO TEÓRICO	5
2.1	Principios básicos de eficiencia energética	5
2.2	Sistemas de climatización convencionales	8
2.2.1	Calderas convencionales	8
2.2.2	Radiadores eléctricos	10
2.2.3	Sistemas de aire acondicionado tradicionales.....	10
2.3	Tecnologías renovables para climatización aplicadas a la vivienda	12
2.3.1	Calderas de biomasa	12
2.3.2	Paneles solares térmicos	17
2.3.3	La bomba de calor	23
2.3.4	Hibridaciones y elementos pasivos	37
2.4	Marco normativo y políticas energéticas actuales	40
2.4.1	Certificación y etiquetado energético.....	40
2.4.2	Ayudas, subvenciones y beneficios fiscales	44
3.	DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA OBJETO DE ESTUDIO.....	47
3.1	Características de la vivienda objeto de estudio.....	47
3.2	Demanda de ACS	51
3.3	Demanda de calefacción	54
3.4	Consumo energético y costes de la instalación actual	55
4.	ALTERNATIVAS DE REHABILITACIÓN ENERGÉTICA.....	57
4.1	Propuesta de rehabilitación con caldera de biomasa.....	61
4.2	Propuesta de rehabilitación con bomba de calor aire-agua.....	62
4.3	Propuesta de rehabilitación con bomba de calor aire-agua + paneles fotovoltaicos.....	64
5.	ANÁLISIS ENERGÉTICO, MEDIOAMBIENTAL Y ECONÓMICO.....	67
5.1	Análisis energético.....	67
5.2	Análisis medioambiental	68
5.3	Análisis económico: Coste de los nuevos sistemas renovables.....	71

5.4 Análisis económico: Indicadores clave para el análisis de la inversión ..	75
5.3.1 Valor Actual Neto	76
5.3.2 Tasa Interna de Retorno	77
5.3.3 Periodo de Recuperación de la Inversión	77
5.3.4 Retorno sobre la Inversión	78
5.3.5 Resumen del estudio económico	78
6. CONCLUSIONES.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: CICLO DE REFRIGERACIÓN AIRE ACONDICIONADO. FUENTE: (KOSNER, 2016)	11
FIGURA 2: GASTOS ACUMULADOS EN 5 AÑOS EN FUNCIÓN DEL COMBUSTIBLE UTILIZADO. FUENTE: (IDAE, 2007)	16
FIGURA 3: GASTOS ACUMULADOS EN 15 AÑOS EN FUNCIÓN DEL COMBUSTIBLE UTILIZADO. FUENTE: (IDAE, 2007)	16
FIGURA 4: MAPA SOLAR DE ESPAÑA. FUENTE: (IDAE, 2006).....	17
FIGURA 5: ESQUEMA BÁSICO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR PARA ACS. FUENTE: (IDAE, 2006).....	18
FIGURA 6: PARTES DE UN CAPTADOR SOLAR PLANO. FUENTE: (IDAE, 2022).....	20
FIGURA 7: COEFICIENTE DE PÉRDIDAS TÉRMICAS PARA DISTINTOS GASES EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN EN CAPTADORES DE TUBOS DE VACÍO SCHOTT. FUENTE: (PEUSER ET AL., 2005)	21
FIGURA 8: TUBO DE VACÍO DE FLUJO DIRECTO. FUENTE: (IDAE, 2022)	21
FIGURA 9: TUBO DE VACÍO HEAT PIPE O DE FLUJO INDIRECTO. FUENTE: (IDAE, 2022).....	22
FIGURA 10: TUBO DE VACÍO TIPO SIDNEY. FUENTE: (PEUSER ET AL., 2005)	22
FIGURA 11: TUBO DE VACÍO EN U. FUENTE: (IDAE, 2022).....	23
FIGURA 12: CICLO DEL REFRIGERANTE DE UNA BOMBA DE CALOR. FUENTE: (GARCÍA MONTES ET AL., 2014) ..	24
FIGURA 13: CONVERGENCIA DE LA TEMPERATURA DEL TERRENO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD. FUENTE:(HEVIA-HAZA GARCÍA, 2024)	26
FIGURA 14: FLUJOS DE ENERGÍA DEL CICLO DE UNA BOMBA DE CALOR. FUENTE: (GARCÍA MONTES ET AL., 2014)	26
FIGURA 15: DIFERENCIAS ENTRE CICLO DE REFRIGERACIÓN Y DE CALEFACCIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR. FUENTE: (GARCÍA MONTES ET AL., 2014)	27
FIGURA 16: GRÁFICA CONSUMO DE ENERGÍA-TIEMPO DE UNA BOMBA DE CALOR PARA EQUIPOS TODO-NADA E INVERTER. FUENTE: (ESPIÑEIRA, 2021).....	28
FIGURA 17: GRÁFICO TEMPERATURA DEL FLUIDO REFRIGERANTE DENTRO DEL EVAPORADOR EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DURANTE UN DESESCARCHE. FUENTE:(ARNABAT, 2016)	29
FIGURA 18: COMPARATIVA DE LA CANTIDAD DE CALOR ATRAPADO POR CADA TONELADA DE GAS QUE SE ESCAPA A LA ATMÓSFERA. FUENTE: (HEVIA-HAZA GARCÍA, 2023).....	32
FIGURA 19: SUELO RADIANTE Y COLECTORES. FUENTE: (ACTIVA ENERGÍAS RENOVABLES, 2021)	34
FIGURA 20: RADIADOR ESTÁNDAR DE ALUMINIO. FUENTE: (FERRETERÍA ONLINE VTC, S. F.)	34
FIGURA 21: RADIADOR DE BAJA TEMPERATURA. FUENTE: (INSTALTEC, S. F.)	35
FIGURA 22: TIPOS DE FANCOILS. FUENTE: (AUTOSOLAR, S. F.)	36
FIGURA 23: CURVAS DE CONFORT DE LOS PRINCIPALES EMISORES. FUENTE: (HEVIA-HAZA GARCÍA, 2024)	36
FIGURA 24: LOS CINCO PRINCIPIOS DEL PASSIVE-HOUSE. FUENTE: (PASSIVHAUS INSTITUT, S. F.)	38
FIGURA 25: EJEMPLO DE NIVEL DE ESCALA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA. FUENTE: (SERRANO, 2024).....	41
FIGURA 26: EJEMPLO TIPO DE LA ETIQUETA DE CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO TERMINADO. FUENTE: (COMUNIDAD DE MADRID, 2023)	42
FIGURA 27: EJEMPLO DE ETIQUETA ENERGÉTICA DE UNA BOMBA DE CALOR. FUENTES: (DOMÍNGUEZ, 2022B) Y ELABORACIÓN PROPIA.	43
FIGURA 28: ETIQUETA ENERGÉTICA DE EQUIPOS COMBINADOS. FUENTE: (ARNABAT, 2015).....	44
FIGURA 29: SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE TRESCASAS, SEGOVIA. FUENTES: (WIKIPEDIA, S. F.-B) Y (WIKIPEDIA, S. F.-A).....	47
FIGURA 30: ZONAS CLIMÁTICAS DE ESPAÑA SEGÚN LE CTE. FUENTES: (MINISTERIO DE TRANSPORTES MOVILIDAD Y AGENDA URBANA, 2022A)	48
FIGURA 31: DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA P0 DE LA VIVIENDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	49
FIGURA 32: DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA P1 DE LA VIVIENDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	49
FIGURA 33: VALORES MÍNIMOS DE OCUPACIÓN DE CÁLCULO EN USO RESIDENCIAL PRIVADO. FUENTE: (MINISTERIO DE TRANSPORTES MOVILIDAD Y AGENDA URBANA, 2022A)	51
FIGURA 34: GRÁFICA DE LA DEMANDA DE ACS MENSUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	53
FIGURA 35: GRÁFICA DE LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN MENSUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	54
FIGURA 36: DEMANDA ELÉCTRICA DE LA BOMBA DE CALOR Y PRODUCCIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	65

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: EMISIONES-AÑO DEL CICLO DE VIDA. FUENTE: (IDAE, 2007)	13
TABLA 2: COMPOSICIÓN DE LAS CENIZAS DE LAS ASTILLAS DE MADERA. FUENTE: (IDAE, 2007).....	15
TABLA 3: CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR POR SU MEDIO EXTERIOR E INTERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	25
TABLA 4: PARÁMETROS EVALUADOS EN CADA GRUPO DE COEFICIENTES. FUENTE: (SAUNIER DUVAL, S. F.).....	31
TABLA 5: TABLA RESUMEN DE LOS DISTINTOS EMISORES Y SU USO EN BOMBAS DE CALOR. FUENTE: (IDAE & AFEC, 2023)	36
TABLA 6: CONDICIONES PROYECTO CALEFACCIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÍNIMA) FUENTE: (IDAE, 2010)Y ELABORACIÓN PROPIA.	50
TABLA 7: TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES DEL AIRE EXTERIOR EN SEGOVIA Y EN TRESCASAS: FUENTES: (IDAE, 2010) Y ELABORACIÓN PROPIA.....	50
TABLA 8: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE AGUA FRÍA EN °C PARA SEGOVIA Y TRESCASAS. FUENTES: (MINISTERIO DE TRANSPORTES MOVILIDAD Y AGENDA URBANA, 2022A) Y ELABORACIÓN PROPIA.	52
TABLA 9: DATOS DE LA DEMANDA DE ACS MENSUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	52
TABLA 10: DEMANDA DE CALEFACCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	54
TABLA 11: PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE LOS CONSUMOS DE LA CALDERA DE GASOIL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	55
TABLA 12: CONSUMOS Y COSTES MENSUALES CON LA CALDERA DE GASOIL ACTUAL. FUENTES: ELABORACIÓN PROPIA	56
TABLA 13: VALORES DE TRANSMITANCIAS PARA LAS DISTINTAS SUPERFICIES TOMADOS PARA LOS CÁLCULOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	58
TABLA 14: POTENCIA NECESARIA DE CALEFACCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	60
TABLA 15: PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE LOS CONSUMOS DE LA CALDERA DE PELLETS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	61
TABLA 16: CONSUMOS Y COSTES CON LA CALDERA DE PELLETS ESCOGIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	61
TABLA 17: POTENCIA NECESARIA DE CALEFACCIÓN CON BOMBA DE CALOR REVERSIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	62
TABLA 18: PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE LOS CONSUMOS DE LA BOMBA DE CALOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63
TABLA 19: CONSUMOS Y COSTES CON LA BOMBA DE CALOR ESCOGIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63
TABLA 20: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA SOLAR CON PVGIS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	65
TABLA 21: DEMANDA ELÉCTRICA DE LA BOMBA DE CALOR Y PRODUCCIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	66
TABLA 22: CONSUMOS ENERGÉTICOS DE LOS DISTINTOS SISTEMAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	67
TABLA 23: EMISIONES DIRECTAS DE CO ₂ E PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
TABLA 24: EMISIONES INDIRECTAS DE CO ₂ E PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
TABLA 25: EMISIONES TOTALES DE CO ₂ E PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
TABLA 26: CANTIDAD DE ENERGÍA RENOVABLE EN EL CASO DE LA BOMBA DE CALOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	70
TABLA 27: PRECIO DE INSTALACIÓN DE LA OPCIÓN 1 - CALDERA DE BIOMASA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..	71
TABLA 28: PRECIO DE INSTALACIÓN DE LA OPCIÓN 2 - BOMBA DE CALOR AIRE - AGUA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	72
TABLA 29: PRECIO DE INSTALACIÓN DE LA OPCIÓN 3 - BOMBA DE CALOR AIRE-AGUA + PANELES FOTOVOLTAICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	72
TABLA 30: RESUMEN INVERSIÓN INICIAL DE LOS DISTINTOS EQUIPOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	72
TABLA 31: COSTES ANUALES DE ENERGÍA Y DE MANTENIMIENTOS PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	73
TABLA 32: AHORROS ANUALES DE ENERGÍA, DE MANTENIMIENTOS Y TOTALES PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	73

TABLA 33: AHORRO TOTAL EN 15 Y 20 AÑOS PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
TABLA 34: FLUJOS DE CAJA Y ACUMULADOS DURANTE 20 AÑOS PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	75
TABLA 35: RESULTADOS DEL VAN A 15 Y A 20 AÑOS PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
TABLA 36: RESULTADOS DEL TIR A 15 Y A 20 AÑOS PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
TABLA 37: RESULTADOS DEL PAYBACK PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
TABLA 38: RESULTADOS DEL ROI A 15 Y A 20 AÑOS PARA LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
TABLA 39: TABLA RESUMEN DE LOS INDICADORES CLAVE ECONÓMICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del estudio

El sector residencial desempeña un papel relevante en el consumo energético global, donde representa una cantidad significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero o GEI. Según el Consejo de Defensa de los Recursos Naturales (NRDC), organización no gubernamental con base en los Estados Unidos, la energía utilizada en edificios representa el 28 por ciento de las emisiones globales que impulsan el cambio climático (Natural Resources Defense Council, s. f.). Este contexto refuerza la cada vez más urgente necesidad de optimizar el uso de la energía en las viviendas a través de la transición a tecnologías sostenibles y renovables, especialmente en este periodo de crisis climática global.

La sustitución de sistemas energéticos convencionales por alternativas renovables no solo tiene el potencial de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también de reducir la dependencia de combustibles fósiles, además del ahorro económico que supone. Esta transición respalda el cumplimiento de los compromisos internacionales establecidos en los Acuerdos de París, así como las metas de neutralidad climática fijadas para 2050 por la Unión Europea y España, impulsando la sostenibilidad y la reducción de emisiones en línea con las políticas globales y nacionales.

Gracias a estar alineada con las políticas de sostenibilidad impulsadas por gobiernos a nivel global y locales, la transición hacia fuentes de energía renovables incluye incentivos económicos, beneficios fiscales y normativas específicas que fomentan su integración en las viviendas. Por lo tanto, estos cambios no solo implican consecuencias ambientales, sino también económicas al permitir a las personas reducir sus facturas energéticas en mercados energéticos muy volátiles.

Desde un punto de vista más técnico, el análisis del ahorro energético y económico derivado de esta transformación es fundamental para la justificación de la viabilidad, sin la cual no se podría destacar la importancia de promover tecnologías renovables en el sector residencial. Este trabajo de fin de máster busca proporcionar una visión detallada de los beneficios de este enfoque, desde la reducción de las emisiones hasta el impacto económico positivo, lo que contribuye a la discusión sobre cómo hacer la transición energética accesible y efectiva en viviendas unifamiliares, que ya disponen de un sistema de climatización convencional.

1.2 Objetivos y alcance

El propósito principal de este trabajo de fin de máster es analizar y demostrar el potencial de ahorro energético y económico derivado de la sustitución de sistemas de climatización convencionales por tecnologías renovables en viviendas unifamiliares. En un contexto global de creciente preocupación por el cambio climático y la sostenibilidad, esta investigación pretende destacar los beneficios de adoptar tecnologías más sostenibles en el sector residencial. La transición hacia soluciones de climatización basadas en energías renovables no solo contribuye a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve un uso más racional de los recursos energéticos, alineándose con las metas de neutralidad climática establecidas a nivel internacional.

En el ámbito económico, el trabajo examinará el impacto positivo que estas tecnologías pueden tener a lo largo de su vida útil, considerando tanto el ahorro directo en costes energéticos como los de mantenimiento, e informando acerca de posibles incentivos fiscales y subvenciones.

En cuanto a los límites del estudio, se centrará exclusivamente en viviendas unifamiliares, considerando características específicas como tamaño, ocupación y ubicación para el caso concreto. Además, se delimitará el análisis a ciertas tecnologías renovables de climatización, como la caldera de biomasa y la bomba de calor aerotérmica, así como su posible hibridación con paneles fotovoltaicos, excluyendo tecnologías que no se adapten a este tipo de vivienda por su viabilidad económica y/o técnica. Por otro lado, este trabajo no abarcará aspectos relacionados con la eficiencia energética en otros sistemas domésticos, como electrodomésticos, iluminación o sistemas eléctricos. La investigación se enfocará exclusivamente en los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria o ACS, debido a su elevado impacto en el consumo energético y su relevancia en los objetivos de ahorro.

El marco de análisis combinará un enfoque teórico, basado en una revisión de la literatura existente y las normativas actuales, con un enfoque práctico, mediante la evaluación de un caso de estudio concreto. Este caso incluirá comparativas entre tecnologías convencionales y renovables, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico. Al final, se espera que este trabajo ofrezca una perspectiva clara y detallada sobre los beneficios y desafíos de la transición energética en el sector residencial, proporcionando información útil para aplicaciones prácticas o incluso futuras investigaciones.

1.3 Metodología y estructura del documento

La metodología propuesta que se seguirá en este trabajo de fin de máster combina un enfoque teórico y práctico, estructurado en varias etapas clave para abordar los objetivos marcados. A continuación, se detalla brevemente el guion que se seguirá en el desarrollo de esta investigación:

- Para comenzar, en el **Capítulo 2: Marco Teórico** se realizará una revisión de la literatura de fuentes académicas, técnicas y normativas con relación a distintos términos y parámetros acerca de eficiencia energética y sostenibilidad en el ámbito de estudio, las tecnologías de climatización convencionales y renovables con aplicación en viviendas unifamiliares y normativas y políticas energéticas tanto nacionales como internacionales. Este marco teórico será fundamental para contextualizar el estudio y definir los parámetros de análisis.
- Tras haber planteado y definido el marco teórico, en el **Capítulo 3: Definición de la Vivienda Estudio**, se describirá la vivienda de estudio, con sus características físicas principales, los sistemas convencionales de climatización instalados y un diagnóstico de sus consumos actuales. Esta etapa permitirá establecer una referencia con la que comparar las alternativas que se proponen.
- A continuación, en el **Capítulo 4: Alternativas de Rehabilitación Energética**, se realizará un análisis de diversas tecnologías renovables para sustituir al sistema de climatización convencional actual, con modelos concretos presentes en el mercado.
- Una vez descritos dichos equipos, en el **Capítulo 5: Análisis Energético y Económico** se realizará una comparación tanto a nivel energético como posteriormente económico para demostrar que la implantación de tecnologías renovables en sustitución de las convencionales supondrá ahorro en los consumos y un retorno de la inversión que permitirá el ahorro monetario.
- Finalmente, en el **Capítulo 6: Conclusiones** se realizará una discusión final sobre los datos obtenidos mediante un análisis global que resuma los hallazgos y proporcione una idea sobre la temática tratada, extrayendo conclusiones claras sobre los posibles beneficios e identificando las limitaciones del estudio y las posibles líneas de investigación futuras.

Con esta metodología se pretende cumplir con el objetivo final de ofrecer una visión integral y aplicada sobre el impacto de la rehabilitación energética de viviendas hacia tecnologías de climatización renovables.

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

2. MARCO TEÓRICO

La climatización en rasgos generales se define como el proceso por el cual se controlan las condiciones interiores de los edificios para mantener el confort humano, lo que implica regular la temperatura, humedad, movimiento y limpieza del aire (ASHRAE, 2021). Como muy bien explica la ASHRAE en el capítulo 9 de la bibliografía recién citada, el confort es una cuestión mental de satisfacción condicionada por un proceso cognitivo con múltiples variables de carácter físico, fisiológico o psicológicos entre otros. Pese a que el clima, las condiciones de vida y las culturas son muy ampliamente diversas a lo largo de todo el planeta, las condiciones de confort elegidas por las personas son muy similares. Gracias al control que se puede tener sobre los distintos sistemas es posible elegir a gusto del consumidor dichas condiciones, pero es de especial importancia hacerlo de una manera lo más respetuosamente posible con el medio ambiente.

2.1 Principios básicos de eficiencia energética

La eficiencia energética tiene multitud de definiciones, pero todas expresan que es la relación entre la energía demandada para realizar un servicio y la cantidad total de energía consumida para proporcionar dicho servicio. El objetivo principal de la existencia de este concepto implica optimizar los recursos energéticos disponibles, logrando los mismos resultados con un consumo menor y minimizando las posibles pérdidas. En definitiva, la eficiencia energética busca hacer más con menos, sin mermar el nivel de confort y la funcionalidad.

La eficiencia energética no se reflejará únicamente en la reducción de los costes económicos, sino que también tendrá un impacto significativo en el aspecto medioambiental que, concretamente, se fundamente en dos conceptos:

1. La **disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**, ya que al consumir menos energía se reduce la dependencia de combustibles fósiles, los cuales son responsables de gran parte de las emisiones de CO₂.
2. La **preservación de recursos naturales**, gracias a que la optimización del uso de la energía evita la sobreexplotación de recursos finitos.

Como se puede observar este concepto no implica solo una relación entre dos valores de energía, sino que conlleva una serie de connotaciones con un significado evolutivo a favor de la sostenibilidad. A su vez, cabe preguntarse qué factores son determinantes para caracterizar la eficiencia energética. La respuesta radica en el diseño del sistema energético para maximizar su rendimiento, el comportamiento del usuario, basado en su educación y concienciación energética que definen sus hábitos de uso, y las normativas o políticas, con regulaciones como el Código Técnico de Edificación (CTE) en España, que impulsa la implementación de medidas de eficiencia.

Resulta especialmente relevante cómo caracterizar y cuantificar la eficiencia energética. Como se ha desarrollado antes la eficiencia energética ($\eta_{sistema}$) se podría cuantificar mediante la Ecuación 1

$$\eta_{sistema} = \frac{\text{Energía Útil Demandada}}{\text{Energía Consumida}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Este parámetro se podría describir en tanto por uno o en tanto por ciento si se multiplicase por 100 y resulta útil para comparar productos que requieran y suministren energía de cualquier tipo.

Por otra parte, el segundo aspecto clave para evaluar los sistemas de climatización respecto al medioambiente es el impacto ambiental asociado a sus emisiones de los gases de efecto invernadero. Más concretamente las emisiones de dióxido de carbono o CO₂, las cuales pueden clasificarse en dos tipos:

- **Emisiones directas:** son las que se generan *in situ* por la propia combustión de los combustibles fósiles utilizados, como pueden ser el gas natural o el gasoil en calderas. Se calculan en función del poder calorífico de dicho combustible y su factor de emisión de CO₂ asociado, como indica la Ecuación 2.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones Directas CO}_2 &= m_f \cdot FE_{combustible} = \\ &= \frac{E_{térmica demandada}}{PCI \cdot \eta_{sistema}} \cdot FE_{combustible} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- **$E_{térmica demandada}$** es la energía térmica demandada por el sistema (kWh).
 - **PCI** es el poder calorífico inferior del combustible (kWh/kg).
 - **$\eta_{sistema}$** es la eficiencia del sistema en la conversión de energía.
 - **$FE_{combustible}$** es el factor de emisión del combustible utilizado (kg CO₂/kg).
 - **m_f** es la masa de combustible utilizada (kg).
- **Emisiones indirectas:** asociadas al consumo de electricidad, debido a que la electricidad puede provenir de diferentes fuentes energéticas con distintos niveles de emisiones de CO₂, ya que también hay que contabilizar las emisiones asociadas a la producción de dicha electricidad. Para su cálculo se tiene en cuenta el factor de emisión del sistema eléctrico del país como refleja la Ecuación 3, el cual es dependiente de la combinación de las fuentes renovables y las no renovables para producir la energía en la red eléctrica.

$$Emisiones Indirectas CO_2 = E_{eléctrica} \cdot FE_{eléctrica}$$

Ecuación 3

Donde:

- $E_{eléctrica}$ es el consumo eléctrico del sistema (kWh).
- $FE_{electricidad}$ es el factor de emisión de la electricidad, que varía según el mix energético de cada país (kg CO₂/kWh).

Por tanto, para calcular una estimación de forma simplificada de las emisiones totales de CO₂ de un sistema de climatización se podría utilizar la Ecuación 4, que resulta la suma de emisiones directas e indirectas.

$$Emisiones Totales CO_2 = Em.Directas CO_2 + Em.Indirectas CO_2$$

Ecuación 4

La Ecuación 2 tiene matices en cuanto a las unidades. Si no se utilizase el PCI, el $FE_{combustible}$ tendría unidades de kg CO₂/kWh, y si el PCI fuese de un líquido en vez de un sólido es posible que se encuentren valores para el $FE_{combustible}$ en kg CO₂/l o kg CO₂/m³ (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, 2024).

Otro aspecto a considerar es que cuando se realiza una combustión no solo se emite CO₂ como gas de efecto invernadero, sino que también se emiten CH₄ y N₂O, pero los factores de emisión suelen contener también la consideración y contribución de estos gases, o incluso pueden venir desglosados para su cálculo individual. Cuando el dato del factor de emisión viene en conjunto suele identificarse como “CO₂e”.

Si tenemos una caldera de combustibles fósiles, la mayor parte de las emisiones provienen de la combustión *in situ* del combustible. En contrapartida, las bombas de calor tienen emisiones directas nulas, y las indirectas dependen de la eficiencia de la bomba de calor mediante su COP/SCOOP (o EER/SEER en refrigeración) y del mix energético de la red eléctrica. Si se estudia el caso de la biomasa, se puede considerar neutra en emisiones de CO₂ por su origen biogénico, pero también se dispone de datos de los $FE_{combustible}$ para los distintos productos de la biomasa si se decidiese calcularlo.

Con esta metodología se pueden comparar las emisiones de distintos sistemas, basados tanto en combustibles fósiles como en tecnologías renovables, para tratar de elegir el que menos huella de carbono tenga y contribuir a la transición hacia sistemas más sostenibles.

2.2 Sistemas de climatización convencionales

En el presente documento se va a entender como sistema de climatización convencional a cualquier conjunto de equipos y tecnologías que son utilizables en vivienda para poder proporcionar confort térmico, ya sea calefacción, ACS, refrigeración y/o ventilación, pero que son dependientes de fuentes de energía no renovables como la electricidad generada a partir de fuentes tradicionales o de combustibles fósiles como son el gas natural, el propano o el gasoil.

Estos tipos de sistemas se caracterizan por una alta dependencia energética, altos costes de operación comparados con las alternativas renovables y un gran impacto a nivel de emisión de gases de efecto invernadero. Es por ello por lo que forman el punto de partida de este Trabajo de Fin de Máster para evaluar las posibles mejoras a través de su sustitución por tecnologías renovables y más eficientes. A continuación, se citan algunos de los sistemas convencionales más comunes en viviendas unifamiliares.

2.2.1 Calderas convencionales

En las viviendas unifamiliares es bastante común que la calefacción y el ACS dependa de calderas de diversos tipos. En todos ellos la diferencia radica en el principio de funcionamiento, pero su objetivo común es el de calentar agua para después distribuirlo mediante un circuito cerrado hacia elementos terminales de calefacción, como los radiadores o el suelo radiante, o hacia el sistema de ACS para suministrar agua caliente a grifos y duchas. Estos sistemas también se conocen de forma más coloquial como sistemas de calefacción “hidráulica” o “hidrónicas” por el hecho de calentar agua y enviarlo a los elementos terminales por tuberías (ASHRAE, 2023). Los diferentes tipos de calderas para este uso son:

1. **Calderas de gasóleo:** el gasóleo es un derivado del petróleo que se utiliza en calefacción y ACS de forma muy común. El gasóleo se almacena en un depósito conectado a la caldera y se va quemando para generar el calor que calienta el agua gracias a su gran capacidad térmica para generar dicho calor, lo cual es muy útil en climas fríos o viviendas especialmente grandes o menos aisladas. Los tanques de almacenamiento permiten un control del usuario sobre el combustible para así poder considerar cuándo comprarlo, especialmente cuando a nivel económico sea más barato, ya que es un mercado con fluctuaciones significativas. Las calderas de este tipo son bastante robustas y proporcionan calefacción de forma continua durante largos periodos, teniendo una dependencia eléctrica poco significativa por norma general. El gasóleo se inyecta en la cámara de combustión para mezclarse con el aire y generar una llama controlada. En calefacción se necesita un intercambiador de calor para transferir la energía al agua del circuito cerrado y en ACS puede añadir además un depósito acumulador para disponer de agua caliente de una manera más eficiente. Suelen requerir de gran espacio para instalarse de

manera segura, sus mantenimientos deben ser frecuentes para prevenir averías generalmente producidas por acumulación de partículas y hollín y así garantizar su eficiencia y, a nivel medioambiental, emiten CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas, lo que contribuye al cambio climático y empeora la calidad del aire de forma local.

2. **Calderas de gas:** en este tipo de calderas el gas natural, compuesto principalmente de metano, o el Gas Licuado de Petróleo o GLP, compuesto de propano, butano y propileno (TC Energía, s. f.), se mezcla con aire en el quemador de la caldera de manera similar a las de gasóleo. Son populares en zonas geográficas con acceso a redes de gas natural, aunque en zonas rurales se convierten en una alternativa con tanques de almacenamiento de GLP. Energéticamente es posible obtener rendimientos incluso ligeramente superiores 100% en calderas de gas modernas como las de condensación, que aprovechan el calor residual de los gases de combustión y en comparación con las de gasóleo emiten menos CO₂ y apenas generan partículas en suspensión. De hecho, existen diversas políticas hacia la descarbonización y la transición energética que incentivan el uso de biogás y gases sintéticos en lugar de combustibles fósiles. Si la vivienda no dispone de una instalación previa adecuada sus costes iniciales pueden ser elevados y aunque no es muy común, es necesario realizar mantenimientos regulares al estar trabajando con un gas altamente inflamable ante los posibles riesgos de fugas o explosiones.
3. **Calderas eléctricas:** su funcionamiento difiere completamente de los anteriores sistemas de calderas ya que no utiliza ningún tipo de combustible de manera directa, al calentar el agua mediante resistencias eléctricas por medio del efecto Joule, explicado en el subapartado 2.2.2 sobre radiadores eléctricos y descrito mediante la Ecuación 5. Su eficiencia energética es muy alta ya que toda la energía eléctrica se convierte en calor y requiere menos infraestructura que otros sistemas al no requerir de salidas de gases ni depósitos de combustible. Además, no producen gases de efecto invernadero ni NO_x o SO_x al no quemar combustibles. Son especialmente comunes en zonas donde no es posible acceder a suministros de gas natural u otros combustibles, pero su coste de energía primaria puede ser más costoso y, si la electricidad proviene de fuentes no renovables, puede existir un impacto ambiental significativo.

En las calderas de combustión, se puede hacer una diferencia entre las de condensación y las no condensantes, donde en las primeras se aprovecha el calor latente del vapor de agua en los gases de combustión y requieren temperaturas de retorno entre 50 y 55 °C para la mayor parte de la temporada de calefacción, y en las segundas se deben mantener temperaturas elevadas en el agua de retorno para evitar la condensación y daños en el equipo.

2.2.2 Radiadores eléctricos

Los radiadores eléctricos utilizados para calefacción basan su funcionamiento en el conocido como “efecto Joule” a partir del cual se genera calor mediante el paso de la corriente eléctrica a través de un conductor debido a la resistencia del material de dicho conductor. Por lo tanto, estos dispositivos se componen de los siguientes componentes:

- **Elemento calefactor:** la propia resistencia que se calienta y emite el calor. A mayor resistencia y/o mayor intensidad, mayor es el calor emitido y producido por el efecto Joule siguiendo la Ecuación 5.

$$Q = P \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$$

Ecuación 5

Donde:

Q = Calor producido por efecto Joule (J)

P = Potencia eléctrica (W)

t = tiempo (s)

I = intensidad eléctrica (A)

R = Resistencia eléctrica (Ω)

- **Fluido térmico:** es opcional y se utiliza para distribuir de manera más uniforme el calor por el radiador. Es bastante común que este fluido sea un aceite térmico.
- **Cuerpo del radiador:** parte del radiador que facilita la transferencia de calor al ambiente, generalmente hecha de metales como el acero o el aluminio.
- **Termostato:** es el mecanismo de control de la temperatura que actúa regulando el flujo de corriente hacia las resistencias para mantener, disminuir o aumentar dicha temperatura.

El mecanismo de transferencia de calor al espacio a calentar que utilizan los radiadores eléctricos es la convección, por la cual se calienta el aire circundante, le hace disminuir su densidad y asciende, por lo que el aire frío pasa a estar en la zona baja del habitáculo y de nuevo se calienta y asciende, produciendo así un ciclo convectivo (Blanco et al., 2024).

2.2.3 Sistemas de aire acondicionado tradicionales

Cuando se trata de refrigerar un espacio, comúnmente se ha optado por la instalación de los sistemas de aire acondicionado tradicionales. Estos sistemas toman el calor de un espacio y lo liberan al exterior mediante un ciclo de refrigeración por compresión de un refrigerante, ilustrado en la Figura 1, con cuatro etapas esenciales:

1. **Evaporación:** cuando el fluido pasa por el evaporador se hace un intercambio de calor. El fluido pasa de frío a caliente absorbiendo el calor del espacio interior y este espacio se refrigera cediendo su calor al fluido.
2. **Compresión:** el fluido refrigerante en estado gaseoso es comprimido y así aumenta su presión y temperatura.
3. **Condensación:** el refrigerante caliente pasa al condensador, donde libera el calor al ambiente del exterior y se enfría para pasar a estado líquido.
4. **Expansión:** mediante una válvula de expansión se produce el descenso de la presión y temperatura del fluido refrigerante de forma drástica. Posteriormente el ciclo se repite con la vuelta del fluido al evaporador.

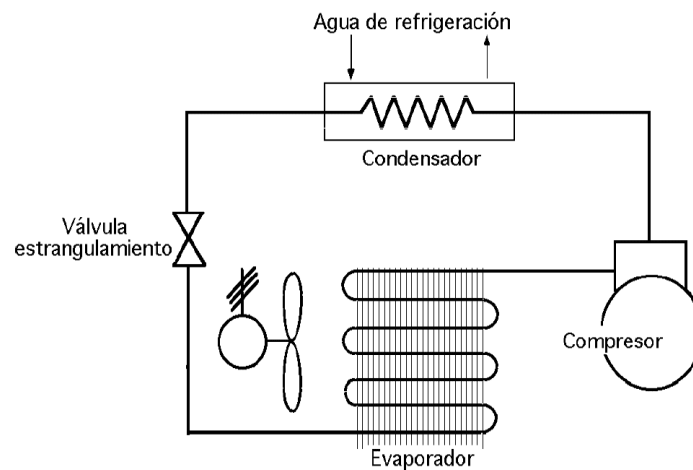


Figura 1: Ciclo de Refrigeración Aire Acondicionado. Fuente: (Kosner, 2016)

Los equipos de aires acondicionado más comunes tienen una unidad interior, con el serpentín evaporador y una unidad exterior con el condensador, el compresor y un ventilador (Hitachi, 2022).

El ciclo de refrigeración no difiere del ciclo seguido en una bomba de calor cuando trabaja en modo frío como se explicará más adelante. Además, si solo se pretende dar frío, es considerablemente más barato un equipo de aire acondicionado que una bomba de calor, tanto en su adquisición como en su mantenimiento, al tener una tecnología más simple. Aun así, los rendimientos son más bajos, los refrigerantes usados en equipos tradicionales suelen ser menos respetuosos con el medio ambiente, aparte de poder dar calor al poder ser reversibles.

2.3 Tecnologías renovables para climatización aplicadas a la vivienda

Optimizar el uso de la energía no solo es una necesidad técnica, sino también una responsabilidad ambiental. Por ello este trabajo gira en torno a las tecnologías renovables para climatización que son aquellas que utilizan fuente de energía renovable como el sol, el viento, el agua, la biomasa, el calor geotérmico, para minimizar el impacto ambiental y reducir la dependencia existente de los combustibles fósiles. Además, suponen un ahorro económico en para el consumidor final. A continuación, se desarrollan las principales tecnologías renovables usadas en climatización para viviendas unifamiliares.

2.3.1 Calderas de biomasa

La biomasa es una solución de calefacción que utiliza combustibles sólidos considerados como fuente renovable como pellets, astillas, leña o huesos de frutas para generar la energía térmica. No se trata de una tecnología nueva ya que se llevan sustituyendo calderas tradicionales por las de biomasa desde la década de los 70, aunque en la actualidad la tecnología es más fiable y los costes se han vuelto más competitivos. Una definición muy acertada de biomasa sería la que aporta la Directiva 2009/28/CE que, aunque este derogada en la actualidad, lo define como “la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales”.

En las calderas de biomasa el combustible sólido se introduce en el hogar de la caldera y a través de un intercambiador hace que se caliente el agua, que es posible almacenarlo en depósitos acumuladores para utilizarlo más tarde y así almacenar ese exceso de calor que se puede producir. Como es evidente, es necesario un mantenimiento constante para limpiar los restos de cenizas y residuos de la combustión y requieren de un espacio considerable para la caldera y el almacenamiento del combustible. Suele tener un coste inicial algo elevado pero sus emisiones netas de CO₂ pueden considerarse bajas debido a que los combustibles vegetales habrán capturado durante su crecimiento CO₂ de la atmósfera, es decir, el balance es neutro, y se desprende además vapor de agua. Además, una gran cantidad de la biomasa utilizada procede de residuos que son necesarios eliminar.

Si la situación de la vivienda es cercana a zonas de fácil acceso a estos combustibles puede tener unos costes operativos bajos en comparación con otras alternativas. En cuanto a la instalación, es factible usar las mismas tuberías de calefacción y el mismo acumulador existentes si están en buenas condiciones porque sus requisitos no difieren del resto de calderas. Además, este tipo de calderas dispone de subvenciones específicas para su instalación en proyectos de rehabilitación energética debido al carácter sostenible de sus

combustibles. En caso de sustituir unas calderas por otras son una opción muy válida a nivel medioambiental, por lo que están situadas dentro de las tecnologías renovables, y cuentan con ventajas como que no desprenden olores como el gasóleo, ni dan opción a fugas peligrosas como el gas, además de ser más silenciosas debido a la ausencia de un quemador que insufla aire para pulverizar el combustible. La tecnología desarrollada permite que sean accionadas manualmente o controladas mediante electrónica y cuentan con altos rendimientos entre un 85 y un 92%, similares a las calderas de gasóleo o de gas (IDAE, 2007). La Tabla 1 muestra las emisiones-año del ciclo de vida de los principales combustibles utilizados en calderas.

Tabla 1: Emisiones-año del ciclo de vida. Fuente: (IDAE, 2007)

Elemento	Gasóleo de Calefacción	Gas Natural	Astilla de madera y pellets
CO ₂ (kg)	35	90	20
SO ₂ (kg)	205	20	48
CO(t)	195	160	15
Partículas (kg)	20	10	30

El principal inconveniente que presentan estas tecnologías es la necesidad de espacio para almacenar el combustible, dado a la relativamente baja densidad energética de la biomasa, y la disponibilidad del suministro ya que, aunque cada vez hay más fabricantes de combustibles de biomasa, no existe una gran red de distribuidores. Pese a ello, se puede considerar que en el aspecto de la economía es un nicho de mercado interesante para producir empleo en el ámbito rural. También es cierto que tiene menos poder calorífico que los combustibles fósiles tradicionales. Por ejemplo, se necesitarían dos kilogramos de pellet para producir la misma energía que un litro de gasoil (Arnabat, 2023).

La biomasa escogida como combustible condiciona el tipo de caldera a utilizar y viceversa, donde se dispone en el mercado de diversas opciones como calderas de pellets, de astillas, mixtas, etc. (Arnabat, 2023). No hay que confundir este tipo de calderas, que tienen aplicaciones tanto domésticas como industriales con potencias de 12 a 500 kW, con las denominadas estufas de pellets que, aunque el combustible es el mismo, estas no cuentan con grandes potencias (en torno a 10kW) y suelen ser utilizadas en el ámbito residencial para calentar estancias individuales o picos de demanda. El caso más común y cada vez más extendido son las calderas de pellets, que se alimenta mediante un tornillo sinfín generalmente, ya que, gracias a su poder calorífico y compactación, son muy eficientes, además de ser más compactas que el resto de las calderas de biomasa. Es reseñable también que su potencia se modula de forma sencilla y alcanzan rendimientos superiores al 90%, y si la caldera es de condensación se puede alcanzar valores entorno al 100%, requiriendo por tanto menos combustible.

2.3.1.1 EQUIPAMIENTO GENERAL DE LAS CALDERAS DE BIOMASA

Los sistemas de climatización con biomasa deben tener unos equipos o sistemas principales como son el almacén de combustible (como un silo o una tolva) un sistema de alimentación (a través de un tornillo sinfín, un sistema neumático o uno por gravedad), la propia caldera con su hogar de combustión, su zona de intercambio de calor, un cenicero, la chimenea, y los sistemas de distribución de calor y de regulación y control que son iguales que en los sistemas de calderas convencionales.

TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE COMBUSTIBLE

Gracias a que los combustibles presentan pequeña granulometría, se suelen vender en sacos normalizados de 15 kilogramos o mediante la descarga mediante un camión cisterna a un silo o a una tolva en la vivienda. Una vez almacenado, se lleva a la caldera por medio de distintos sistemas como rascadores, tornillos sinfín rígidos o flexibles, o suelos inclinados.

ALMACENAMIENTO DE BIOMASA

Como se ha comentado antes, uno de los principales inconvenientes es el espacio necesario para almacenar el combustible, pero existen diversos modos para realizarlo, desde depósitos hasta habitaciones acondicionadas para ello, contando siempre con las necesidades y obligaciones en materia de seguridad correspondiente, en las cuales se priorizan medidas para evitar incendios accidentales.

INTERCAMBIADOR DE CALOR

Se compone de una serie de tubos verticales para transferir el calor de los humos al agua, distinguiendo entre pirotubulares, en las que los humos circulan por los tubos del intercambiador que está separados de la cámara de combustión y el agua rodea dichos tubos, o acuotubulares, que actúan de forma inversa donde el agua circula entre los tubos y los gases de la combustión los rodean.

SISTEMA DE COMBUSTIÓN

El hogar de combustión está compuesto generalmente por un sistema de combustión y una cúpula de distribución de los gases producidos, además de disponer de una regulación del caudal del aire de combustión para optimizarla.

RETIRADA DE CENIZAS

Las cenizas producidas por la combustión de la biomasa pueden llegar a ser de hasta el 1% del combustible consumido, por lo que su recogida suele ser una tarea de baja frecuencia, La retirada de estas cenizas puede ser directamente de forma manual o la caldera puede contener un sistema que mediante un

tornillo sinfín transporte y compacte estas cenizas para una retirada más sencilla. Se calcula que si se trata de pellets de madera 100% será necesario retirarlas una o dos veces anualmente, además de que pueden ser utilizadas como fertilizante para plantas debido a su composición no tóxica, mostrada en la Tabla 2.

En el caso de desear tirarlas a la basura esto es posible, siempre que se cumplan las normativas municipales. Claro está que además de la retirada de las cenizas, es necesario realizar los mantenimientos recomendados por el fabricante para garantizar la vida útil del sistema.

Tabla 2: Composición de las cenizas de las astillas de madera. Fuente: (IDAE, 2007)

Compuesto	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O
% en Peso	24,6	46,6	4,8	6,9	0,5	2,8

EVACUACIÓN DE HUMOS

Para evacuar los humos únicamente se requiere de una chimenea con salida al ambiente exterior de la vivienda, donde las emisiones no varían sustancialmente de las de los combustibles fósiles, además de ser mucho menores que las del carbón. Únicamente difiere en la presencia de vapor de agua debido a la humedad contenida en el combustible que se evapora, por lo que se aumenta el volumen de los gases y se requiere de un diámetro ligeramente mayor.

REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

Cobra relevancia el hecho de que es posible alimentar con calderas de biomasa máquinas de absorción para refrigeración. En vez de utilizar un sistema de compresión eléctrico utilizan calor en forma de agua caliente para el ciclo de absorción basado en las propiedades de distintas disoluciones acuosas con sales de bromuro o cloruro de litio. De esta forma se aumenta el número de horas de uso de la caldera haciéndola más rentable y utilizando el combustible en épocas de calor donde pueden ser más baratos por la bajada de la demanda.

2.3.1.2 COMPARATIVA ECONÓMICA ENTRE CALDERAS DE BIOMASA Y DE COMBUSTIBLES TRADICIONALES

El IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), en el documento bibliográfico mencionado “Biomasa: Edificios” (IDAE, 2007), desarrolla un estudio económico comparativo entre un sistema alimentado por biomasa y por otros combustibles. Pese a que la aplicación de ese estudio se realiza sobre un edificio de 20 viviendas y no en viviendas unifamiliares, resulta interesante para extraer ciertas conclusiones. Se utilizaron una caldera de gasóleo, otra de gas natural y dos de biomasa de distinta inversión inicial. El resto de las hipótesis de

partida está disponible de forma abierta para su consulta en el documento, pero no son excesivamente relevantes para las conclusiones que se van a extraer. A continuación, se muestran las gráficas comparativas en la Figura 2 y la Figura 3.

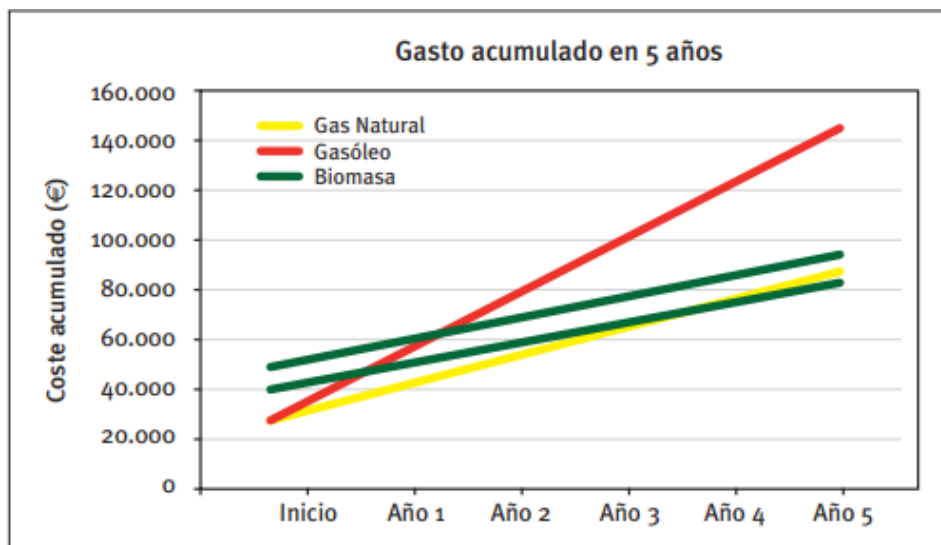


Figura 2: Gastos acumulados en 5 años en función del combustible utilizado. Fuente: (IDAE, 2007)

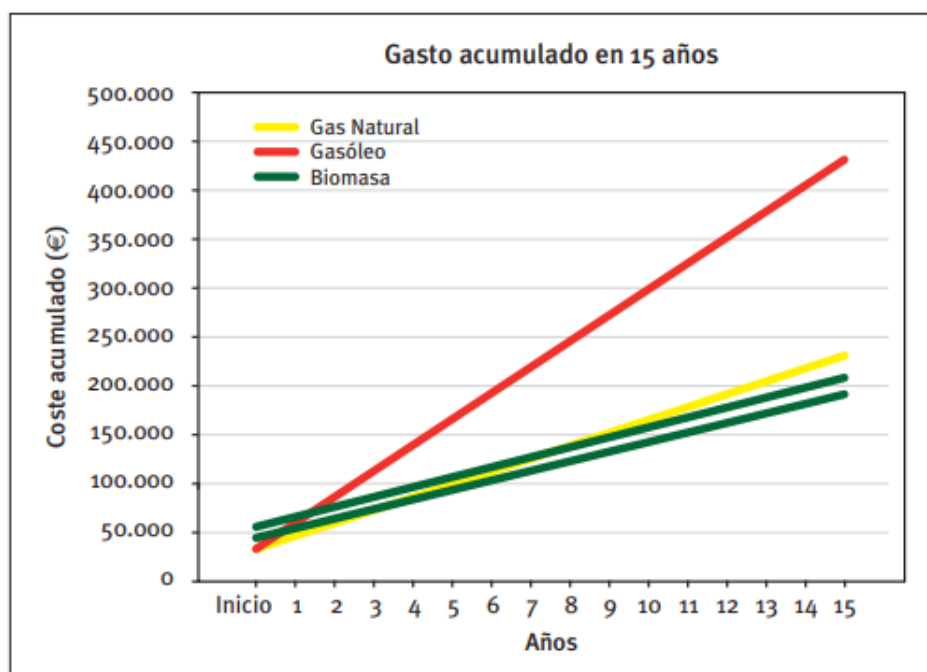


Figura 3: Gastos acumulados en 15 años en función del combustible utilizado. Fuente: (IDAE, 2007)

En la primera gráfica se muestran los cinco primeros años y el coste acumulado. Se parte de que la inversión inicial es mayor para la biomasa, pero el coste acumulado para el gasoil crece rápidamente. Sería un error analizar la inversión desde un periodo de tiempo tan corto ya que la vida útil de estas tecnologías

suele ser de 15 o 20 años, por lo que en la segunda gráfica se observa que el gas natural comienza a superar en costes a la biomasa a partir del octavo año. De estas gráficas se concluye que a la larga es más barato un sistema de calefacción alimentado por biomasa, y esta ventaja económica radica en que el combustible tiene menor coste y un precio de mercado más estable y menos volátil debido a su independencia del petróleo y de mercados internacionales.

2.3.2 Paneles solares térmicos

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la radiación solar para generar calor. Es una energía a priori gratuita e inagotable y que por tanto es 100% renovable, aunque tiene una dependencia clara del número de horas solares de la región donde se ubica la vivienda. En España, como muestra la Figura 4 el potencial de aprovechamiento de la energía solar es muy elevado debido a la cantidad de horas de sol de las que gozan casi todas las provincias. Para poder utilizar esta energía y conseguir ese calor se requiere del uso de los paneles solares térmicos.

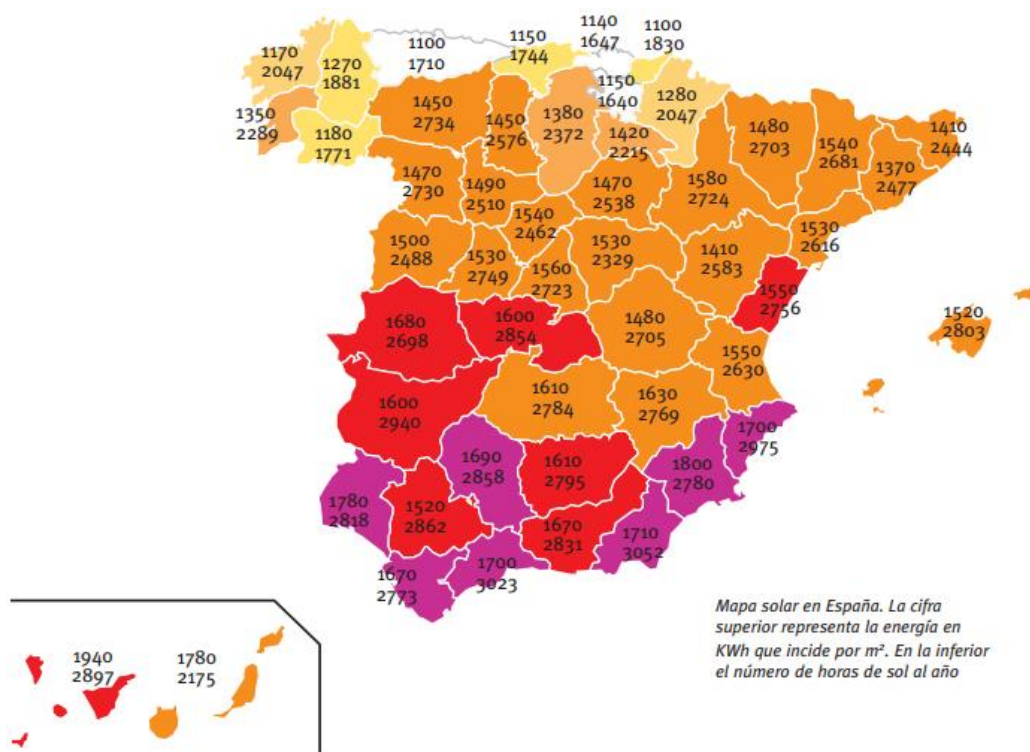


Figura 4: Mapa solar de España. Fuente: (IDAE, 2006)

La tecnología detrás de los paneles solares térmicos es un intercambiador de calor. Este intercambiador de calor transforma la radiación solar incidente en energía térmica a través de los fluidos caloportadores que circulan por su interior y se calientan al pasar por el colector. Se requiere para su correcto funcionamiento una optimización de la superficie de captación, el caudal del

fluido que circula, el volumen del acumulador y la superficie de los intercambiadores, así como de los sistemas de control. Esta tecnología se utiliza principalmente en viviendas cuya ocupación es estable en el tiempo, con disposición de espacio físico para la instalación y con buenas condiciones de captación, es decir, sin sombras, y preferiblemente con orientación sur en el hemisferio norte y viceversa (IDAE, s. f.).

Al estar utilizando la energía solar, se trata de un sistema renovable muy útil para calentar agua de una manera sostenible, principalmente para ACS, pero también para calefacción o incluso para el calentamiento de piscinas. Además, esta energía reduce los costes considerablemente y es energéticamente eficiente, si bien es cierto que por norma general no puede considerarse una sustitución total del resto de sistemas de calefacción y ACS del hogar. Por ello, se tiene que entender como un sistema de apoyo para reducir parte del uso de los sistemas convencionales, los cuales son necesarios como respaldo para garantizar un suministro de energía térmica constante, especialmente durante periodos de baja radiación solar.

El procedimiento que se lleva en estos sistemas solares consiste en la absorción de energía térmica contenida en los rayos del sol que atraviesan la atmósfera. Para ello se utilizan los paneles solares que mediante sus captadores calientan el fluido que circula por su interior. En la Figura 5 se observa el esquema básico de una instalación solar térmica para ACS.

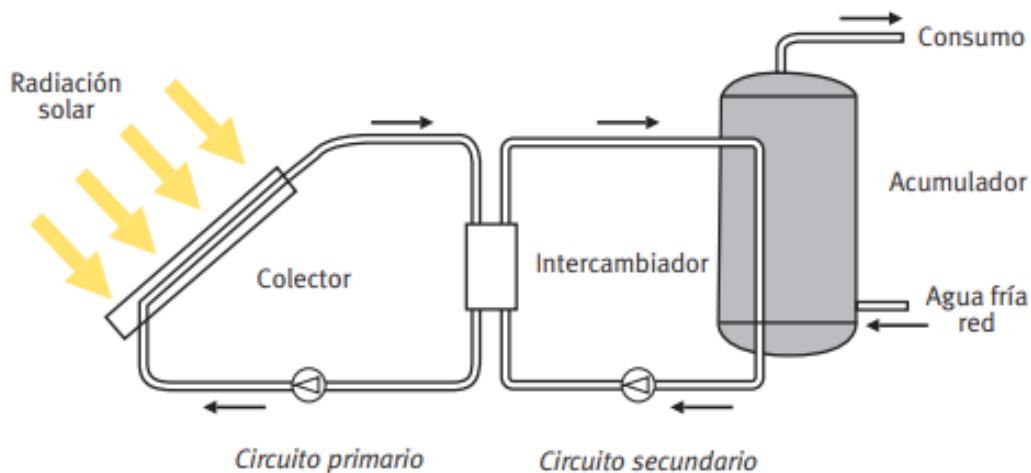


Figura 5: Esquema básico de una instalación solar para ACS. Fuente: (IDAE, 2006)

Los elementos principales de la instalación son:

1. **Captadores solares:** se encargan de absorber la radiación solar y transferirla al fluido caloportador. Hay varios tipos, pero los más comunes son los captadores planos y los de tubo de vacío.
2. **Sistema de distribución:** un circuito hidráulico que transporta el fluido caloportador hasta el acumulador. Dicho fluido puede ser agua si se trata de circulación directa o agua con algún anticongelante, generalmente glicol, en circuitos cerrados para evitar congelaciones en climas fríos.

Evidentemente el circuito debe estar aislado térmicamente para evitar pérdidas de calor.

3. **Acumulador:** se trata de un depósito de almacenamiento que almacena el agua caliente hasta que sea necesario. Puede tener un único intercambiador de calor, si su única fuente de energía es la solar, o dos en el caso de que se utilice un sistema auxiliar como una caldera cuando la radiación solar no es suficiente. Los intercambiadores pueden estar integrados dentro del acumulador en forma de serpentín o en el exterior.
4. **Elementos auxiliares:** sistemas de control y regulación, vaso de expansión, válvulas de seguridad y de retención, bomba de circulación, etc.

Aunque todos los elementos son necesarios, es primordial la optimización y el funcionamiento de los captadores. Su instalación puede estar sujeta a regulaciones estéticas o urbanísticas, por lo que debe verificarse antes de su instalación, y su inclinación es dependiente de la latitud y uso del sistema. A pesar de necesitar un estudio para cada caso concreto, se puede adoptar un criterio general en España (IDAE, 2022) en el que el ángulo de inclinación respecto del plano horizontal sea:

- La latitud geográfica si la instalación es de uso anual constante.
- La latitud geográfica menos 10° si la instalación es de uso estival.
- La latitud geográfica más 10° si la instalación es de uso invernall

Estos tres tipos de consumo se definen como:

- Uso anual: cuando no varía el consumo a lo largo del año o cuando los valores medios diarios mensuales varían por debajo de un 25% respecto del valor medio diario anual.
- Uso estival: el consumo de agua caliente durante como mínimo los cuatro meses de verano es superior en un 50% al valor medio anual.
- Uso invernall: el consumo de agua caliente durante como mínimo los cuatro meses de invierno es superior en un 50% al valor medio anual.

En cuanto al funcionamiento y la estructura de los captadores, como se ha mencionado anteriormente, los más utilizados son los planos y los de tubos de vacío.

2.3.2.1 CAPTADORES PLANOS

Los captadores con colectores de placa plana son los más utilizados en Europa para la captación de energía solar cuando no se necesita que el fluido supere los 100°C. En la Figura 6 se pueden diferenciar sus partes principales:

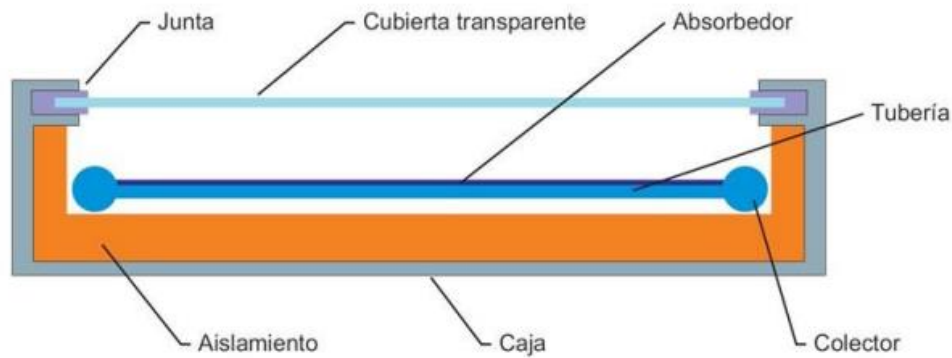


Figura 6: Partes de un captador solar plano. Fuente: (IDAE, 2022)

El componente principal de estos es el absorbedor, que hace la acción de captar la radiación solar incidente y se calienta, transfiriendo la energía térmica al fluido que circula por el interior del circuito hidráulico, y que suele estar hecho de una placa plana metálica. La caja o carcasa que sustenta el resto de los elementos está abierta por arriba y cerrada por abajo, donde tiene un aislante que suele ser lana de roca o fibra de vidrio para reducir las pérdidas de calor. Puede haber una cubierta en la caja compuesta por una o varias láminas de materiales como el vidrio que sean opacas a la radiación de baja temperatura del absorbedor y transparentes para la radiación solar de baja longitud de onda para generar el efecto invernadero necesario que atrape la radiación. Si se ponen varias láminas se logra reducir la transferencia de calor por convección al exterior y por tanto las pérdidas de calor, pero en cambio se aumenta la proporción de radiación incidente que se refleja (Lozano Serrano, 2019).

2.3.2.1 CAPTADORES DE TUBOS DE VACÍO

Los captadores de tubos de vacío tienen el objetivo de reducir las pérdidas por conducción y convección entre el absorbedor y la cubierta. El vacío perfecto no existe, por lo que se tiende a sustituir el aire por un gas con menor conductividad térmica. En la Figura 7 se puede ver la comparación de cómo se reduce el coeficiente de pérdidas térmicas en tubos de vacío tipo *Schott* al reducir la presión con aire y con distintos gases nobles. Estos tubos de vacío reciben su nombre por la empresa alemana que desarrollo dicha tecnología. Los captadores de tubos de vacío están compuestos por un conjunto de tubos conectados hidráulicamente a un distribuidor o colector. Estos tubos están encapsulados en un tubo de vidrio que conforma su cubierta y donde se hace el vacío. La pérdida de vacío sería la avería más crítica que podría tener un captador de este tipo, al igual que una fuga de agua en los captadores planos.

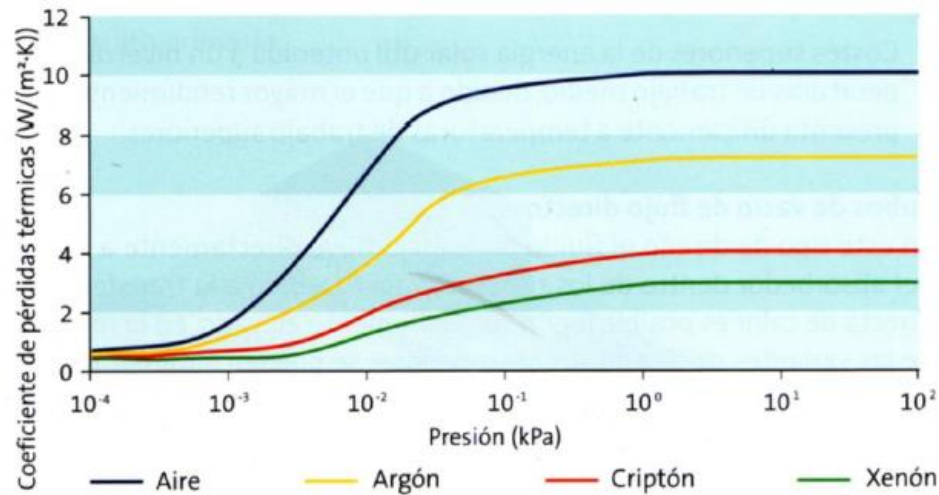


Figura 7: Coeficiente de pérdidas térmicas para distintos gases en función de la presión en captadores de tubos de vacío Schott. Fuente: (Peuser et al., 2005)

Hay diversas configuraciones de tipos de captadores de tubos de vacío, pero los principales son:

Tubos de flujo directo: este tipo de tubos de vacío, como el que se muestra en la Figura 8, fueron los primeros en inventarse y tienen el mismo funcionamiento que los colectores planos. El agua circula en contacto con el tubo de vidrio interior donde la cara exterior tiene el tratamiento para actuar como absorbedor cilíndrico. El agua fría baja por la cara interior inferior y el caliente sube por la superior interior. Por lo general, si el absorbedor está hecho de láminas, estas se pueden girar si se necesita, para así poder alinearlos mejor con el Sol y hacer el montaje sobre cubiertas planas. Se trata de equipos de escasa fiabilidad y durabilidad.

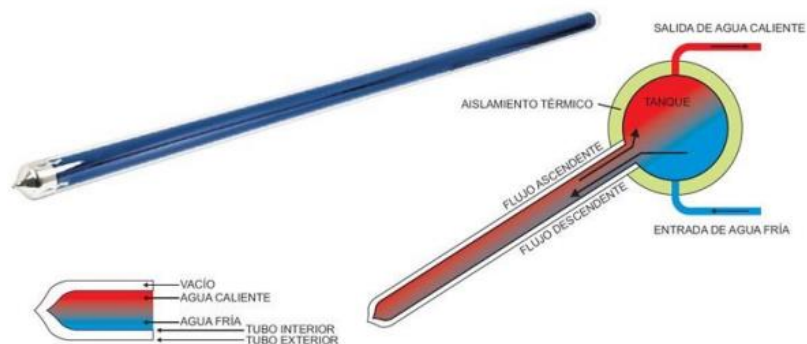


Figura 8: Tubo de vacío de flujo directo. Fuente: (IDAE, 2022)

Tubos Heat Pipe o flujo indirecto: en este sistema se hace uso de un fluido que al calentarse una parte de él se evapora y asciende hacia un intercambiador en el extremo superior del tubo donde se enfría y condensa y así transfiere el calor a otro fluido térmico que se calienta, proceso ilustrado en la Figura 9. En verano en climas cálidos presentan la ventaja de que cuando ya se ha evaporado todo el fluido de los tubos,

absorben mucho menos calor, y de esta forma se evitan deterioros o incluso que estallen. A diferencia de los anteriores, requieren una inclinación mínima del captador de 20° a 30°.

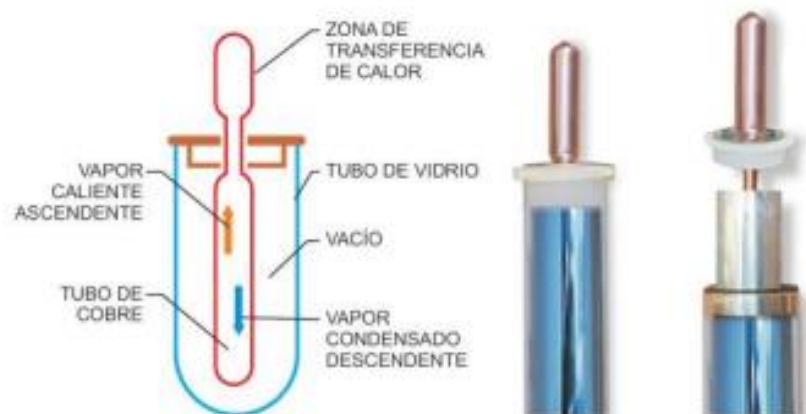


Figura 9: Tubo de vacío Heat Pipe o de flujo indirecto. Fuente: (IDAE, 2022)

Tubos tipo Sidney: se basan en un tubo de vidrio con doble pared para evitar pérdidas de vacío entre el metal y el vidrio. El absorbedor está pegado al tubo interior del vidrio y como es cilíndrica se hace uso de reflectores de la radiación solar como los mostrados en la Figura 10 para aprovechar la zona no iluminada de forma directa por el Sol.

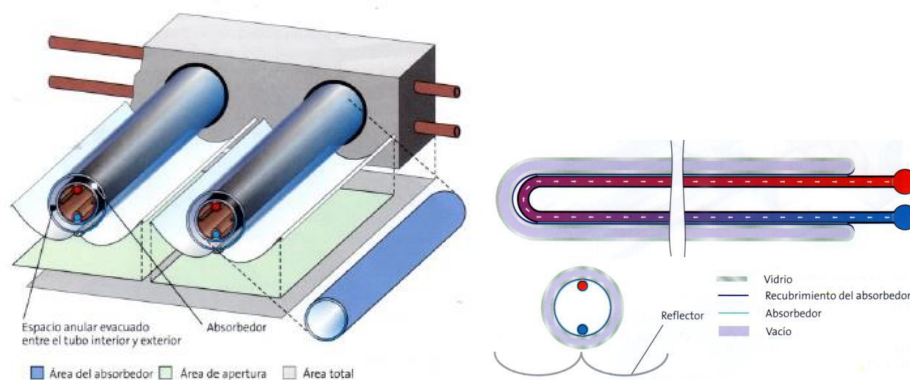


Figura 10: Tubo de vacío tipo Sidney. Fuente: (Peuser et al., 2005)

Tubos en U: dentro del tubo de vacío se sitúa un tubo de cobre con forma de “U” que tiene entrada y salida al colector, como se aprecia en la Figura 11. El fluido entra por un extremo frío y sale por el otro caliente tras haber adquirido temperatura. El absorbedor está adosado a ambos tubos y puede ser plano o cilíndrico.

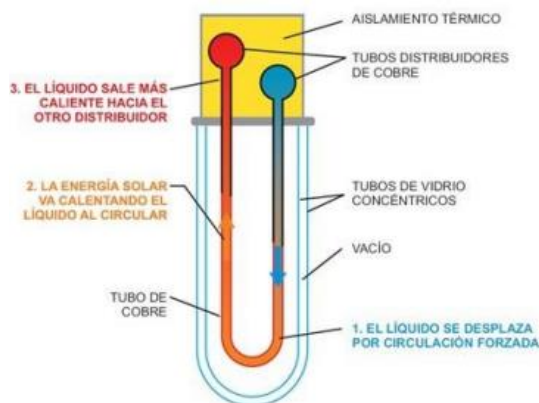


Figura 11: Tubo de vacío en U. Fuente: (IDAE, 2022)

La energía solar térmica se ha consolidado como una solución eficiente y sostenible para producir ACS y apoyar en la producción de calefacción en viviendas unifamiliares y, aunque no siempre puede cubrir la totalidad de la demanda energética, es un excelente complemento cuya implantación permite reducir el consumo y la dependencia de las energías fósiles además de mejorar la eficiencia energética de la vivienda.

2.3.3 La bomba de calor

Una bomba de calor es una máquina térmica que mediante el uso de un gas refrigerante dentro de un ciclo termodinámico cerrado logra transferir calor desde un entorno natural como puede ser el aire, el agua o la tierra, a un edificio, gracias al aporte de trabajo relativamente pequeño que suele provenir de energía eléctrica normalmente. De esta manera el calor fluye de una temperatura más baja a una más alta.

Mediante una bomba de calor se consiguen niveles de eficiencia muy altos ya que de media por cada kilovatio eléctrico consumido se pueden generar 4 kilovatios de energía térmica, se consiguen condiciones de confort mejor reguladas en comparación con otros sistemas, además de conseguir un ahorro sustancial debido a sus bajos consumos de energía y reducir sus emisiones de CO₂ lo que la convierte en equipos sostenible. Son muy versátiles por su capacidad de adaptación a diferentes entornos a la vez que con un solo equipo se puede producir calefacción, refrigeración y ACS y por todo lo anteriormente expuesto contribuyen a una revalorización de la vivienda al mejorar la calificación energética de la vivienda. En conclusión, la bomba de calor presenta múltiples ventajas para diferentes usos siendo apta para todo tipo de climas, como se ha demostrado incluso en países nórdicos, y ha sido reconocida como la mejor tecnología disponible para calefacción por organismos reconocido como la Agencia internacional de la Energía, como indica La Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización (AFEC, s. f.)

En cuanto a su funcionamiento, el ciclo frigorífico que rige el comportamiento de la bomba de calor consta de las siguientes fases:

- **Evaporación:** se realiza en el evaporador, que actúa como intercambiador de calor en el que se produce un cambio de fase de líquido a vapor del refrigerante y cediendo la energía térmica al medio circundante. Para ello, se requiere que las condiciones de la presión del refrigerante sean inferiores a la del medio para poder traspasarle esa energía y realizar el cambio de fase.
- **Compresión:** mediante energía generalmente eléctrica se aporta trabajo para accionar un motor que actúa como compresor se aspira el fluido refrigerante en fase vapor que se ha producido en el evaporador y se comprime, por lo que aumentan su temperatura y presión aportándole la energía necesaria para moverlo.
- **Condensación:** de forma análoga al evaporador, mediante un condensador que actúa de intercambiador de calor, se realiza un cambio de fase, pero esta vez en sentido opuesto, es decir, el refrigerante con alta temperatura y presión pasa de fase vapor a fase líquida, lo que se conoce como condensación. Al condensarse se cede calor al medio circundante, por lo que se requiere que el refrigerante tenga una temperatura superior a la del medio para así enfriar el refrigerante y que se produzca el cambio de fase y se condense.
- **Expansión:** la expansión del refrigerante se realiza mediante una válvula de expansión a la salida del condensador cuya función es regular la pérdida de carga que separa el lado de alta presión del condensador y el de baja presión del evaporador. Tras la válvula de expansión el refrigerante se encuentra en una fase mixta de líquido y vapor y se introduce en el evaporador para iniciar de nuevo el ciclo.

En la Figura 12 se puede observar el esquema de funcionamiento de una bomba de calor con sus tres fuentes externas de calor principales: la tierra, el agua o el aire.

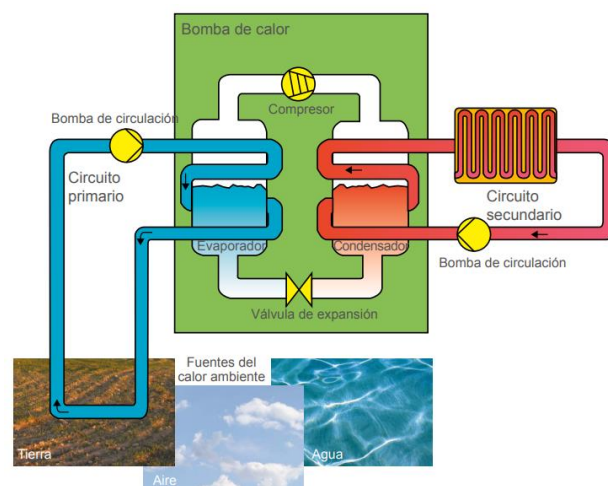


Figura 12: Ciclo del refrigerante de una Bomba de Calor. Fuente: (García Montes et al., 2014)

Esta observación conlleva a clasificar las bombas de calor en función del medio exterior o fuente térmica y del medio al cual se transfiere el calor en el circuito secundario o medio de distribución, que puede ser aire o agua. Por tanto, la clasificación de las bombas de calor y la nomenclatura por la cual se conocen queda reflejada en la Tabla 3.

Tabla 3: Clasificación de las bombas de calor por su medio exterior e interior. Fuente: Elaboración Propia

Medio exterior	Medio interior	Nomenclatura de la bomba de calor	Nomenclatura de la tecnología
Aire	Aire	Bomba de Calor Aire-Aire	Aeroterminia
Aire	Agua	Bomba de Calor Aire-Agua	Aeroterminia
Agua	Aire	Bomba de Calor Agua-Aire	Hidrotermia
Agua	Agua	Bomba de Calor Agua-Agua	Hidrotermia
Tierra	Aire	Bomba de Calor Tierra-Aire	Geoterminia
Tierra	Agua	Bomba de Calor Tierra-Agua	Geoterminia

En viviendas unifamiliares son más comunes las bombas de calor de aeroterminia y geoterminia, si bien es cierto que la geoterminia viene limitada por necesidad de perforar la tierra para realizar los pozos necesarios para su instalación tanto por su alto coste como por sus necesidades físicas de espacio y condiciones del terreno. La hidrotermia no es muy común ya que necesitan de zonas con acceso a aguas continentales (ríos, lagos, mares, ...). En cuanto a la aeroterminia, la bomba de calor aire-aire solo es útil para aportar calefacción y refrigeración, pero no para ACS, además de reducir su eficiencia en climas muy fríos, por lo que el sistema más común suele ser la aeroterminia aire-agua. A continuación, se describe el funcionamiento a grandes rasgos de cada uno de los tipos:

- **Aeroterminia:** la aeroterminia coge en el circuito primario la energía térmica del aire. En ella se distinguen instalaciones *Monoblock*, donde solo existe una unidad en la que se realiza todo el proceso, se usa para aire-agua exclusivamente, y calienta directamente el agua y la envía hacia los emisores térmicos por tuberías; los equipos *Split*, que constan de una unidad exterior y una interior, se usa para aire-aire o aire-agua, y la unidad interior tiene la labor de climatizar el aire que se utiliza para calefactar o refrigerar directamente o conectarse a un depósito de ACS o de agua para equipos terminales de emisión, como el suelo radiante; y por último la configuración *Multi-Split*, exclusiva de aire-aire, que consta de una unidad exterior y varias interiores situadas en las distintas habitaciones a calefactar o refrigerar. Esta configuración también se conoce como VRV (volumen de refrigerante variable) o VRF (flujo de refrigerante variable) ya que se permite la regulación de la cantidad de refrigerante que circula, y en algunos casos se puede conseguir que algunas unidades interiores operen en modo calefacción y otras en modo refrigeración de forma simultánea (ASHRAE, 2023).
- **Geoterminia:** la geoterminia aprovecha el calor del subsuelo a través de unos pozos bastante profundos por los que se hace pasar un conducto y de ahí extraen la energía térmica. La temperatura del suelo es muy estable a lo largo del año, especialmente a partir de los 15 metros de profundidad

donde la temperatura atmosférica no tiene influencia (Hevia-Haza García, 2024) como se observa en la Figura 13, aunque las perforaciones suelen ser más profundas y es importante estudiar la geología del terreno en la zona a actuar, por lo que se considera la tecnología más eficiente, pero tienen una elevada inversión inicial en comparación con las demás que lo convierte en la principal barrera para su instalación. Una vez captada la energía térmica del suelo por parte del fluido se hace el ciclo frigorífico en la bomba de calor.

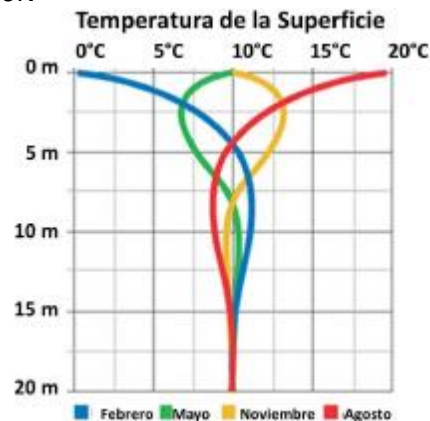


Figura 13: Convergencia de la temperatura del terreno en función de la profundidad.
Fuente: (Hevia-Haza García, 2024)

- **Hidrotermia:** tiene un funcionamiento muy similar a la geotermia, pero se diferencian en que la energía térmica la captan del agua de ríos, lagos o incluso el mar, por lo que el acceso a zonas de ese estilo es complicado y no es muy común.

Como se ha mencionado, las bombas de calor requieren de energía eléctrica. Esta energía se utiliza en el compresor en forma de trabajo, y se aprovecha las distintas energías renovables del ambiente exterior para su utilización, por lo que su eficiencia es superior a la unidad. En la Figura 14 se pueden ver los flujos de energía del ciclo que se lleva a cabo, así como el cambio de estado del fluido refrigerante.

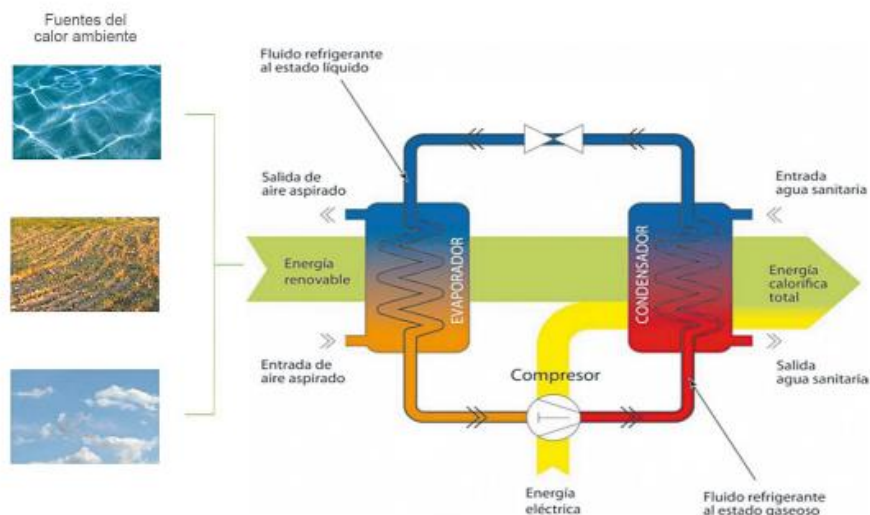


Figura 14: Flujos de Energía del ciclo de una bomba de calor. Fuente: (García Montes et al., 2014)

Una de las mayores ventajas de las bombas de calor, además de usar energías renovables y tener eficiencias superiores a la unidad, es la posibilidad de invertir el ciclo y pasar de aportar calor a la vivienda a retirar calor. Esto se consigue con bombas de calor conocidas como reversibles, en las cuales se invierte el sentido de circulación del refrigerante y por tanto el flujo de calor haciendo uso de una válvula de cuatro vías y una electroválvula para desplazar el sentido de la de cuatro vías, como se muestra en la Figura 15 que distingue entre los dos modos (aporte de calor y retirada de calor o aporte de frío) entre los cuales no hay ninguna diferencia entre los componentes utilizados y donde el evaporador y el condensador intercambian sus funciones.

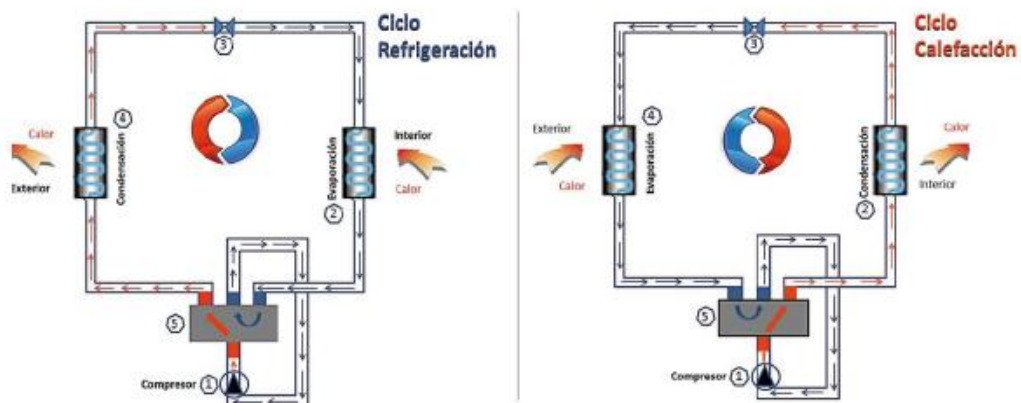


Figura 15: Diferencias entre Ciclo de Refrigeración y de Calefacción de una bomba de calor. Fuente: (García Montes et al., 2014)

Las nuevas bombas de calor suelen incluir la conocida como tecnología “*inverter*”. Este término indica que la alimentación del compresor dispone de un variador de frecuencia que modifica la velocidad de giro del compresor. Con esta premisa se pasa del modo de funcionamiento todo-nada o *on-off*, en el cual al llegar a la temperatura de consigna se paraba el compresor y por debajo de ella se ponía a funcionar al 100% de su potencia, al poder regular automáticamente la potencia que aporta el compresor. Cuando se está cerca de la temperatura de consigna, más o menos a menos de 2°C de diferencia, el compresor trabaja aproximadamente en torno al 45% de su potencia máxima y como consecuencia se reduce la diferencia entre sus presiones de aspiración y descarga, provocando así una reducción del consumo de hasta el 40% de energía eléctrica con una temperatura con menos fluctuaciones, es decir, más estable, y con un rendimiento del equipo más alto, además de reducir el ruido de funcionamiento y alargar la vida útil del sistema (Espiñeira, 2023). Para hacerse una idea, una bomba de calor todo o nada aportarnos 2500 vatios térmicos por cada 1000 vatios eléctricos (COP=2,5, que se explicará su significado más adelante), mientras que en las *inverter* se suele tener COPs mayores a 4. En la Figura 16 se ilustra la comparativa del consumo de energía entre un equipo *inverter* y un equipo todo-nada a lo largo del tiempo.

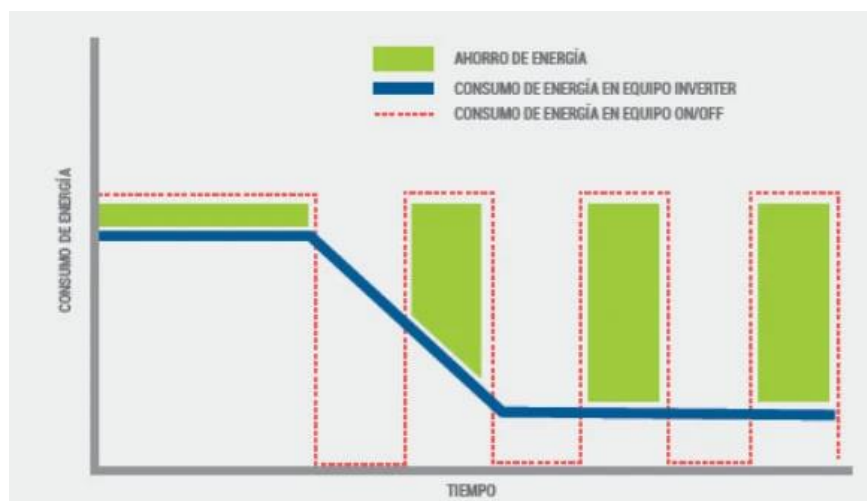


Figura 16: Gráfica Consumo de Energía-Tiempo de una bomba de calor para equipos todo-nada e inverter. Fuente: (Espiñeira, 2021)

En el caso de la instalación de las bombas de calor es muy recomendable la instalación de depósitos de inercia debido a su triple función: reducir los arranques marcha/paro, optimizar la modulación de la tecnología *inverter* y garantizar el volumen mínimo de la instalación (IDAE & AFEC, 2023).

A lo largo del año, cuando las bombas de calor aerotérmicas están actuando como generador de calor, ya sea para calefacción o para ACS, pueden darse las condiciones en las que el aire que atraviesa el intercambiador de la unidad exterior se enfríe por debajo de la temperatura de rocío y se cree escarcha en las aletas del intercambiador. Para solucionar este problema se requiere de un aporte de calor en el evaporador para fundir el hielo y la escarcha que se haya acumulado, y dicho calor se puede aportar de diferentes formas. Una de ellas es mediante un “ciclo de desescarche” en el que se invierte el funcionamiento de la bomba de calor y que por tanto se realiza una pausa temporal del calentamiento. En la Figura 17 se puede ver el gráfico temperatura-tiempo de un ciclo de desescarche. Si el sistema está bien diseñado o se dispone de tecnología *inverter* se puede reducir el impacto generado por esta pausa (Arnabat, 2016). El agua que se produce se acumula en la bandeja de condensaciones del evaporador, que deberá tener una pendiente suficiente para facilitar que no se acumule. Otra forma de realizar el desescarche es a través de resistencias eléctricas sin necesidad de invertir el ciclo, pero es menos frecuente y eficiente, y se suele usar en bombas de calor no reversibles. Si el clima es muy frío se pueden utilizar compresores con inyectores de vapor que inyectan el gas caliente en la entrada del evaporador, pero de nuevo su aplicación está destinada a equipos no reversibles (IDAE & AFEC, 2023). En bombas de calor con fuente exterior de agua o de geotermia, al tener una temperatura más constante no se necesita ciclo de desescarche.

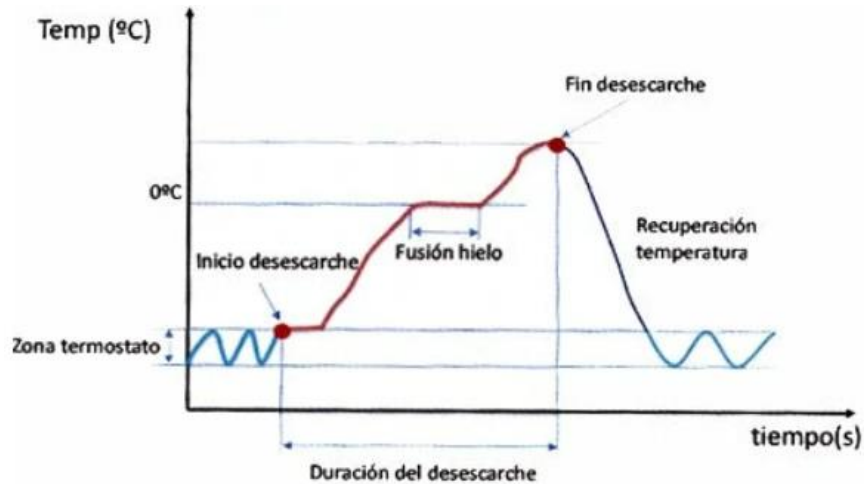


Figura 17: Gráfico temperatura del fluido refrigerante dentro del evaporador en función del tiempo durante un desescarche. Fuente:(Arnabat, 2016)

2.3.3.1 PARÁMETROS DE MEDIDA DE LA EFICIENCIA

En los sistemas de climatización o HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*), como pudieran ser los equipos de aire acondicionado o las bombas de calor, son comúnmente utilizados los conceptos de COP, o *Coefficient Of Performance* en inglés y coeficiente de rendimiento en castellano, y de EER, o *Energy Efficiency Ratio* en inglés y índice de eficiencia energética en castellano. La diferencia entre ellos radica en que el COP se utiliza para calefacción y el EER para refrigeración:

- **COP:** se define como el cociente resultante entre la potencia de calefacción (Q) y la potencia eléctrica que se absorbe a plena carga y con unas condiciones de temperatura concretas (W), como se observa en la Ecuación 6.

$$COP = \frac{\text{Potencia Calorífica Producida}}{\text{Potencia Eléctrica Consumida}} = \frac{Q_c}{W} \quad \text{Ecuación 6}$$

- **EER:** su definición es equivalente a la del COP, pero teniendo en cuenta la potencia de refrigeración en lugar de la de calefacción, como se observa en la Ecuación 7.

$$EER = \frac{\text{Potencia Frigorífica Producida}}{\text{Potencia Eléctrica Consumida}} = \frac{Q_f}{W} \quad \text{Ecuación 7}$$

Tanto el COP como el EER son coeficientes evaluados en unas determinadas condiciones de trabajo puntuales y a plena carga, es decir, coeficientes de

rendimiento instantáneos, lo cual carece apenas de interés para su aplicación, por lo que es necesario analizar ambos en un periodo de tiempo relevante y así conocer el comportamiento de los equipos a lo largo del tiempo teniendo en cuenta sus consumos bajo las diferentes condiciones de trabajo que se le van a presentar. Para ello se evalúan el SCOP y el SEER donde la “S” significa “estacional” (“seasonal” en inglés) y que son por tanto coeficientes de rendimiento estacional. En ellos se tienen en cuenta cargas parciales y los denominados “consumos fantasma”, que son aquellos que tiene el equipo cuando está apagado, desactivado por termostato, en espera o por ciclos de desescarche (Rodríguez, s. f.).

- **SCOP:** se define de forma análoga al COP, pero con un carácter estacional, como se observa en la Ecuación 8.

$$SCOP = \frac{\text{Demanda Anual de Calefacción (kWh)}}{\text{Consumo anual de Energía Eléctrica (kWh)}} \quad \text{Ecuación 8}$$

- **SEER:** se define de forma análoga al EER, pero con un carácter estacional, como se observa en la Ecuación 9.

$$SEER = \frac{\text{Demanda Anual de Refrigeración (kWh)}}{\text{Consumo anual de Energía Eléctrica (kWh)}} \quad \text{Ecuación 9}$$

- En la misma línea que los anteriores coeficientes se puede también definir el **SCOP_{DHW}**, que significa *Seasonal Coefficient of Performance for Domestic Hot Water* y se utiliza como coeficiente de rendimiento estacional de una bomba de calor para agua caliente sanitaria (ACS) y mide la eficiencia energética del sistema durante toda una temporada, obteniéndose en ensayos de laboratorio con las condiciones establecidas en la Norma UNE-EN 16147 o mediante otros métodos de cálculo reconocidos por otras entidades relevantes como el IDAE (IDAE & AFEC, 2023).

Por tanto, se tienen dos grupos principales de coeficientes para comparar las bombas de calor. En la Tabla 4 se muestran los parámetros que evalúa cada coeficiente, de la cual se concluye que el coeficiente más indicado para comparar las bombas de calor es el estacional (SCOP, SEER) por dar una visión más real de la eficiencia de la bomba de calor.

Tabla 4: Parámetros evaluados en cada grupo de coeficientes. Fuente: (Saunier Duval, s. f.)

	COP/EER	SCOP/SEER
Parámetros evaluados	Una temperatura	Varias temperaturas
	Plena carga	Plena carga y cargas parciales
	Modelo básico de funcionamiento	Diferencia entre las 3 zonas climáticas de Europa
		Valores estacionales

De esta tabla se concluye que el coeficiente más indicado para comparar las bombas de calor es el coeficiente de rendimiento estacional por ser el más completo de todos y da una visión más real de la eficiencia de la bomba de calor.

2.3.3.2 REFRIGERANTES Y SU RELACIÓN CON EL MEDIOAMBIENTE

Hoy en día, existen multitud de sistemas de climatización que utilizan fluidos refrigerantes para su funcionamiento. Los refrigerantes son fluidos utilizados en refrigeración, aires acondicionados, y sistemas de bombas de calor. Su función es la de absorber calor desde un área y cederlo en otro, generalmente en un proceso de evaporación y condensación mediante cambios de fase (ASHRAE, 2021). Los refrigerantes tienen preferiblemente una baja viscosidad y una alta conductividad térmica, y son deseables muchas más características físicas y químicas, pero no existe un refrigerante que sea el óptimo para todos los usos, por lo que su elección dependerá de dichas características y del uso que se le pretende dar.

Dado que no se está hablando de diseño de máquinas en este trabajo, las propiedades de mayor interés son las relacionadas con el medio ambiente. Esencialmente los valores más relevantes son el ODP y el GWP.

- El **ODP** (en castellano Potencial de Agotamiento del Ozono o en inglés *Ozone Deployment Potential*) mide el daño que causa a la capa de ozono dicho refrigerante. Los clorofluorocarbonos o CFCs y los hidroclorofluorocarbonos o HCFCs tienen un alto ODP debido a los átomos de cloro de sus moléculas. Por lo general se compara con el CFC-11 (triclorofluorometano o R-11) que tiene un ODP = 1.
- El **GWP** (en castellano Potencial de Calentamiento Global o en inglés *Global Warming Potential*) evalúa el calor que puede atrapar el refrigerante en comparación con el dióxido de carbono o CO₂ que tiene un GWP base de 1. Cuanto mayor es el GWP mayor efecto invernadero produce un refrigerante. Es posible realizar una equivalencia según la Ecuación 10, que calcula las toneladas equivalentes de CO₂ multiplicando

las toneladas del refrigerante por el potencial de calentamiento global que tiene el refrigerante en cuestión.

$$\text{ton CO}_2\text{e} = \text{ton Refrigerante} \cdot \text{GWP del Refrigerante} \quad \text{Ecuación 10}$$

Por tanto, las tendencias actuales radican en la eliminación o reducción progresiva de los CFCs, HCFCs y HFCs bajo diversos acuerdos internacionales como el Protocolo de Montreal (UNEP, s. f.) y la enmienda de Kigali (UNEP, 2019) y en una transición hacia los HFOs y refrigerantes naturales que combinan un menor impacto ambiental con una alta eficiencia. Aunque la inversión inicial pudiera ser más costosa, es posible generar ahorros a largo plazo. Además, aparte de intentar minimizar las posibles fugas, es necesario eliminar correctamente los refrigerantes al final de su vida útil.

Con los HFC, como gases fluorados que son, la normativa de la Unión Europea pretende reducir sus niveles de emisiones progresivamente, teniendo en cuenta su GWP. Son ampliamente utilizados en bombas de calor y su uso está restringido a un máximo de 750 GWP siempre y cuando su carga sea de menos de 3 kilogramos hasta que queden prohibidos en 2025 (Eurovent-Certification, 2023a). Ejemplo de ello es el R-32 con un GWP de 675 que es ampliamente utilizado para este uso. Lo que se pretende es una sustitución gradual hacia refrigerantes naturales como el propano o R-290, el amoníaco o R-717, o el dióxido de carbono o R-744, que en general se caracterizan por bajos valores de GWP y OPD nulo, pero con los que es posible que haya que extremar las precauciones y la seguridad por su posible toxicidad o inflamabilidad.

Otra opción son los HFO o Hidrofluoroolefinas como alternativa a los HFC que tienen un ODP nulo y un GWP bajo, con los mismos posibles riesgos que los naturales (Eurovent-Certification, 2023b). Se consideran la nueva generación de refrigerantes, y existen opciones como el R-513A cuyo rendimiento es similar al del R-134A, aunque no todos los HFO tienen una eficiencia energética tan relevante. En la Figura 18 se observa la comparativa de la cantidad de calor atrapado por cada tonelada de gas que se escapa a la atmósfera para distintos refrigerantes.



Figura 18: Comparativa de la cantidad de calor atrapado por cada tonelada de gas que se escapa a la atmósfera. Fuente: (Hevia-Haza García, 2023).

En España, el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE) y el Reglamento de Instalaciones Frigoríficas (RIF) son los marcos normativos que

regulan el diseño, la instalación y el mantenimiento de los sistemas térmicos y frigoríficos, incluyendo información específica sobre el uso de los refrigerantes sobre su eficiencia energética, sostenibilidad y seguridad. Por ejemplo, el R-290 está clasificado como A3, que indica que es de baja toxicidad y alta inflamabilidad, o se aportan limitaciones como que debe utilizarse en instalaciones con ventilación adecuada por su alta inflamabilidad.

2.3.3.3 EQUIPOS TERMINALES O EMISORES DE LAS BOMBAS DE CALOR AIRE-AGUA

Como se ha comentado antes, en viviendas unifamiliares es más común y eficiente instalar bombas de calor aire-agua que aire-aire debido a la ventaja de poder utilizarlas también para ACS. Por ello se considera necesario describir los principales equipos emisores de este tipo de bombas de calor, los cuales son válidos también para geotermia e hidrotermia siempre y cuando el fluido al cual se le transmite la energía en el circuito secundario sea agua. Cabe destacar que no son exclusivos para las bombas de calor, pero algunos de ellos son altamente recomendables.

SUELO RADIANTE

El suelo radiante es una de las soluciones para la emisión de calor o frío más reconocidas ya que aportan un confort de calefacción y de refrigeración muy buenos y un rendimiento muy elevado para bombas de calor. Se trata de una red de tuberías de plástico instalada bajo el suelo por toda la superficie de la estancia y cubierta por mortero. El calor o el frío se irradia desde el suelo, y esto constituye un beneficio muy claro en el caso del calor y es que se tiene la fuente de calor en los pies, lo cual favorece mucho el confort, y el calor va a la parte superior de la estancia por la diferencia de temperaturas y presiones. Se caracterizan por considerarse un circuito de agua a baja temperatura (entre 30 y 45°C) en contraposición a otros sistemas emisores tradicionales que necesitan mayores temperaturas de impulsión, por lo que conllevan un bajo consumo de energía. Además, al estar instalados bajo el suelo dejan un espacio libre visualmente muy estético y útil para el diseño más amplio de los interiores de la vivienda, donde únicamente se necesitará un armario en la pared para los colectores hidráulicos del circuito de impulsión y retorno, como los que se observan en la Figura 19.



Figura 19: Suelo radiante y colectores. Fuente: (Activa Energías Renovables, 2021)

Evidentemente el suelo radiante tiene varios inconvenientes, entre los que destacan que son sistemas con una alta inercia térmica, lo cual requiere de su instalación en habitáculos muy utilizados, problemas de condensación en suelo refrescante si la humedad de la zona es alta, y su alto precio de instalación, el cuál aumenta si se trata de rehabilitación (Arnabat, 2022).

RADIADORES DE AGUA ESTÁNDAR

Los radiadores son los emisores térmicos más utilizados en las viviendas españolas. En los radiadores estándar, como el que se muestra en la Figura 20 en los que el agua pasa por ellos y el calor se transmite al ambiente, el 20% de la energía se emite por radiación y el 80% por convección, y suelen trabajar con agua de 75°C a 80°C de impulsión y de 60°C a 65°C de retorno, si bien el RITE desde 2021 indica que los emisores térmicos deben de dimensionarse para temperaturas de entrada por debajo de 60°C en calefacción y por encima de 7°C en refrigeración (IDAE & AFEC, 2023).

Los principales materiales para el cuerpo del radiador suelen ser acero, aluminio o incluso hierro fundido en los más antiguos que compensan su alta inercia térmica con una mayor retención del calor a lo largo del tiempo tras parar su funcionamiento.



Figura 20: Radiador estándar de aluminio. Fuente: (Ferretería online VTC, s. f.)

Las bombas de calor trabajan normalmente en rangos de temperatura de entre 35°C y 60°C y su mayor rendimiento se consigue cuanto menor es la temperatura de impulsión necesaria, por lo que su uso con radiadores estándar no es el

óptimo, aunque se pueden utilizar refrigerantes que ayuden a alcanzar altas temperaturas.

RADIADORES DE AGUA DE BAJA TEMPERATURA

Una vez tratados los radiadores estándar, es necesario hablar de los radiadores de baja temperatura, como el de la Figura 21. En ellos la transmisión de calor se produce por convección, y tienen una temperatura de trabajo de en torno a 40°C. Cuanto menor sea el salto térmico entre la temperatura de ida y la de retorno menor será la potencia emitida por el radiador. Gracias a ello son más eficientes en el caso concreto de las bombas de calor, pero también en otros sistemas convencionales. Además, emiten el calor de forma más directa sin “viajar” por la habitación.

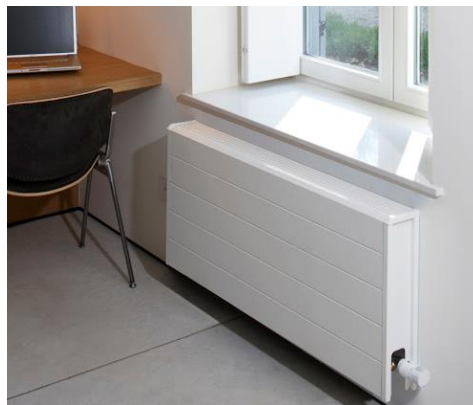


Figura 21: Radiador de baja temperatura. Fuente: (Instaltec, s. f.)

Hay que tener en cuenta que, si se trata de su instalación en rehabilitación para la sustitución de radiadores estándar, al trabajar a una menor temperatura es posible que sea necesario aumentar el número de elementos del radiador ya que se necesitará más superficie para calentar la estancia (Domínguez, 2022a).

VENTILOCONVECTORES O FANCOILS

Los conocidos como *fancoils* son unidades interiores en las cuales, como su propio nombre indica, utilizan un ventilador que fuerza el paso de aire sin calentar o enfriar a través de un serpentín por el que circula el aire caliente o frío, permitiendo así el intercambio de calor y expulsarlo al recinto a climatizar, por lo que combinan el doble uso para calentar y enfriar con una ventilación forzada de bajo consumo (San Vicente, 2023). Pueden situarse en el suelo, aunque su instalación está más dirigida para el techo o las paredes. En la Figura 22 se muestran los diversos tipos.



Figura 22: Tipos de Fancoils. Fuente: (AutoSolar, s. f.)

En la Tabla 5 se muestra un cuadro resumen respecto a los emisores mencionados y su uso en bombas de calor.

Tabla 5: Tabla resumen de los distintos emisores y su uso en bombas de calor. Fuente: (IDAE & AFEC, 2023)

Emisor	Rendimiento con bomba de calor	Confort térmico en calefacción	Confort térmico en refrigeración
Radiador estándar	Medio	Bueno	N/A
Suelo radiante	Muy alto	Muy bueno	Muy bueno (potencia limitada)
Radiador de baja temperatura	Alto	Muy bueno	Muy bueno
Fancoils	Alto	Bueno	Muy bueno

En la Figura 23 se puede ver la curva ideal de confort del ser humano y su comparación con distintos emisores donde se observa que el suelo radiante tiene la curva que más se asemeja a la ideal.

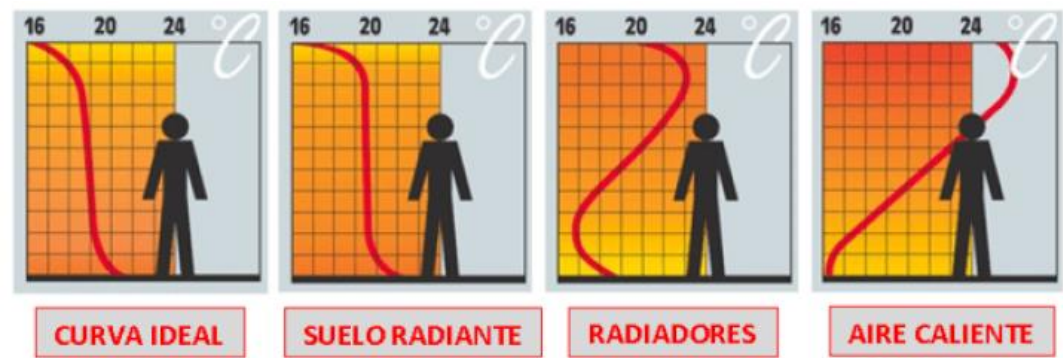


Figura 23: Curvas de confort de los principales emisores. Fuente: (Hevia-Haza García, 2024)

2.3.4 Hibridaciones y elementos pasivos

Cabe la posibilidad de utilizar hibridaciones o combinaciones de distintas tecnologías para optimizar la eficiencia de los equipos

Una de las alternativas más interesantes es combinar la bomba de calor con el uso de paneles fotovoltaicos. Si la bomba de calor genera energía térmica con rendimientos muy elevados utilizando energía eléctrica es indispensable valorar la opción de instalar paneles fotovoltaicos que generen la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento, de forma total o parcial. De esta manera se obtienen ahorros económicos en la factura de la luz y se es más respetuoso con el medio ambiente.

Como se ha mencionado antes, no suele resultar viable utilizar paneles solares térmicos para calentar una vivienda, por lo que su combinación con otros sistemas es una obligación. Evidentemente, cualquiera de los sistemas mencionados puede utilizarse junto con calderas para reducir los impactos ambientales y aumentar su eficiencia si es que alguno de ellos no llega a dar la potencia necesaria para utilizarse de manera única, pero también existe la posibilidad de utilizar lo que se denomina “instalación solar termodinámica”. Estos sistemas combinan el funcionamiento de la bomba de calor con unos paneles similares a los solares térmicos que capten la energía térmica del sol o incluso de la lluvia para transferirla al refrigerante del circuito frigorífico de la bomba de calor. También sería posible la integración de la instalación solar termodinámica con paneles fotovoltaicos, con los beneficios que esto supone.

Por último, es relevante destacar que se han desarrollado paneles solares que son capaz de actuar como térmicos y como fotovoltaicos a la vez, los cuales se denominan paneles solares híbridos o paneles “PVT”. A su vez, cabe pensar en la posibilidad de calentar una vivienda o producir ACS por medio únicamente de paneles fotovoltaicos. Ciertamente esto es posible, pero totalmente desaconsejable ya que comparado con el resto de los sistemas su eficiencia es mucho más baja, se requiere de una gran superficie de captación para ello, y en épocas de mayor demanda, como el invierno, suele ser cuando menor producción de electricidad se da en los paneles fotovoltaicos por razones evidentes (Fundación Descubre - Junta de Andalucía, s. f.).

2.3.4.1 EL CONCEPTO DE PASSIVE-HOUSE

Pese a que en este documento se está hablando esencialmente de sistemas tecnológicos de climatización activa, cabe mencionar también los sistemas pasivos debido a su creciente relevancia. La definición como sistemas “pasivos” se refiere a sistemas de construcción de viviendas o edificios de consumo energético muy bajo, casi nulo. La idea es ahorrar más de un 75% de energía térmica mediante estándares de construcción más elevados sin la necesidad de añadir energía. No hay que confundir la construcción de una casa con sistemas pasivos que conseguir el certificado de “Passivhaus”, el cual hay que solicitar y cumplir con los criterios que impone la institución *Passive House Institute*, que

son considerablemente más restrictivos que los del CTE. Concretamente estos estándares para lograr el certificado son una demanda de calefacción de menos de 15 kWh/(m² año), una demanda de refrigeración inferior a 15 kWh/(m² año), una demanda de energía primaria por debajo de 120 kWh/(m² año) y una hermeticidad de menos de 0,6 renovaciones de aire por hora (Mimesis, 2021).

Este concepto incide sobre cinco principios esenciales ilustrados en la Figura 24, que son:

1. El aislamiento térmico: para evitar perder calor en invierno y evitar que ese calor pase hacia el interior del edificio en verano.

2. Las ventanas: para potenciar el efecto de aislamiento en zonas donde más se pierde el calor, siendo común utilizar PVC o aluminio con ruptura del puente térmico.

3. La ventilación con recuperación de calor: para filtrar el aire de manera controlando los niveles de humedad y temperatura y obtener niveles de confort óptimo, además de transferir calor del aire saliente y viciado al aire entrante (sin contacto directo) para ahorrar energía.

4. La estanqueidad: para que no entre aire no deseado a la vivienda por ningún hueco.

5. El diseño libre de puentes térmicos: son puntos de la envolvente donde se produce más fácilmente la entrada o salida de frío o de calor debido a la conductividad térmica del material o porque esté en contacto con el interior y el exterior simultáneamente.

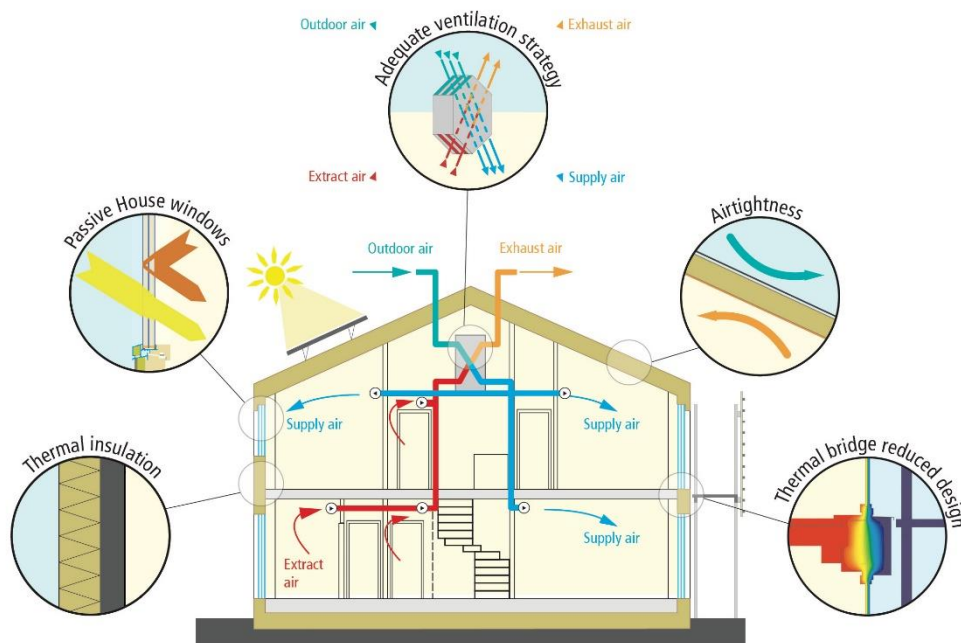


Figura 24: Los cinco principios del Passive-House. Fuente: (Passivhaus Institut, s. f.)

Evidentemente hay impedimentos a superar para poder lograr un diseño óptimo. El emplazamiento y la orientación solar son dos de los factores más influyentes a la hora de realizar el diseño arquitectónico de una vivienda, además de la dirección de los vientos. Se estima que mediante una casa pasiva se puede lograr un ahorro de hasta un 90% de energía de calefacción y refrigeración.

El concepto de *passive-house* no es exclusivo en lo relativo a la nueva construcción, pero, aunque también es aplicable a la rehabilitación, no es tan común en ella debido al alto coste que supondrían cambios de esta tipología.

2.4 Marco normativo y políticas energéticas actuales

Detrás de toda tecnología siempre hay un marco normativo y legislativo. En el caso de climatización en viviendas y la rehabilitación energética existen multitud de documentos de carácter normativo, legal o reglamentario tanto a nivel nacional como internacional, por lo que a continuación se mencionan los más relevantes. Estos documentos están centrados especialmente en la eficiencia energética sin dejar de lado el bienestar de los habitantes, para así alcanzar los objetivos climáticos de descarbonización a largo plazo.

A nivel internacional y continental dentro de la Unión Europea destacan el Acuerdo de París, Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética y la Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios, aunque esta aplica más a nuevas construcciones.

En cuanto a la planificación nacional actualmente se dispone del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 y la Estrategia a Largo Plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación (ERESEE).

Los documentos de referencia a nivel reglamentario son el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) aprobado por el Real decreto 1027/2007, de 20 de julio, y el Código Técnico de Edificación (CTE), aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. De hecho, en el propio CTE se puede encontrar el Documento Básico HE Ahorro de Energía que permiten cumplir el requisito básico de ahorro de energía. Además, en el Real Decreto 552/2019, de 27 de septiembre, el cuál aprueba el Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias, si bien este es de aplicación a procesos industriales, se puede encontrar información acerca de la clasificación de los refrigerantes y otros asuntos de interés.

Otras legislaciones consolidadas a nivel estatal de interés serían el Real Decreto 853/2021, de 5 de octubre, y la Ley 10/2022, de 14 de junio, ambos relativos al Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Además, existe un procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios aprobado por el Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, y también se dispone de diversas ayudas, subvenciones y beneficios fiscales de los cuales se hablará en el apartado 2.4.2 del presente documento.

2.4.1 Certificación y etiquetado energético

En el Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, se aprueba en España el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los

edificios, siendo el texto legal actualmente consolidado, pese a que ya se obligaba a obtener certificados energéticos desde 2007 para obras nuevas y desde 2013 para reformas y edificios existentes. Esta certificación sirve para evaluar y calificar la eficiencia energética de un edificio, en comparación con inmuebles similares, indicando el consumo de energía primaria no renovable, expresado en kWh, y las emisiones de CO₂, en Kg CO₂/m²año, utilizando una escala que lleva asociada un indicador numérico y que va desde la A para los más eficientes hasta la G para los menos eficientes, como se puede ver en la Figura 25.

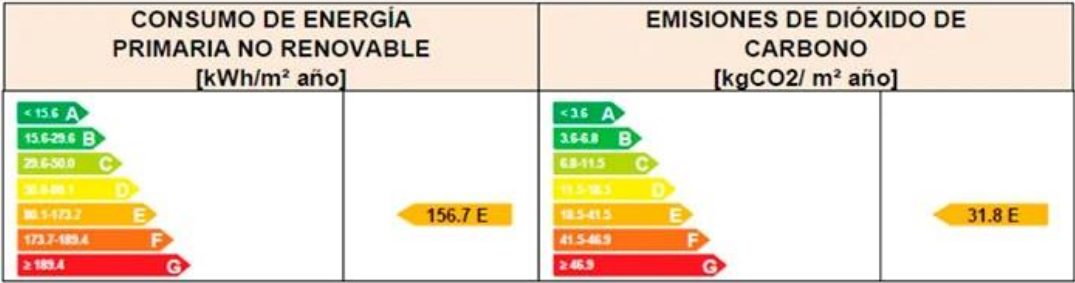


Figura 25: Ejemplo de nivel de escala de eficiencia energética. Fuente: (Serrano, 2024)

En el caso concreto de viviendas el certificado energético es únicamente de instalaciones térmicas. Con esta certificación se pretende informar a futuros compradores o inquilinos, o a cualquier persona interesada en ello, sobre el consumo del inmueble y del edificio y, a su vez de forma intrínseca, fomentar mejoras para la eficiencia energética a través de reformas o en edificios de nueva construcción y reducir el impacto ambiental y el consumo energético. Además, se tienen otras ventajas económicas, bajo el cumplimiento de diversas condiciones, como bonificaciones en el IBI, en el tipo de interés de la hipoteca, deducciones en la declaración de la renta o ayudas y subvenciones para rehabilitación (Serrano, 2024). En la Figura 26 se observa un ejemplo tipo de la etiqueta de calificación energética del edificio terminado.

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO TERMINADO ETIQUETA

DATOS DEL EDIFICIO

Normativa vigente construcción / rehabilitación: CONSTRUCCIÓN 1967

Referencia/s catastral/es: 111111111UF111111OX

Tipo de edificio: Edificios de viviendas

Dirección: CI Nombre de la Calle, Número

Municipio: Localidad

C.P.: Código Postal

C.Autónoma: Andalucía

ESCALA DE CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

	Consumo de energía kW h / m ² año	Emisiones kg CO ₂ / m ² año
A más eficiente		
B		
C		
D		
E	120.05	23.88
F		
G menos eficiente		

REGISTRO

PRY/00455555/01/2020

08/02/2030

Válido hasta dd/mm/aaaa

ESPAÑA

Directiva 2010 / 31 / UE

Figura 26: Ejemplo tipo de la etiqueta de calificación energética del edificio terminado. Fuente: (Comunidad de Madrid, 2023)

Por otro lado, en el campo de los electrodomésticos para facilitar la comparación de los distintos productos y su eficiencia, especialmente para el pequeño consumidor, la Unión Europea creó otro etiquetado energético que facilita la elección de opciones más sostenibles y ayuda en la reducción del impacto ambiental y en los costes energéticos. Además, este etiquetado, integrado en la Directiva ErP o Directiva *Energy Related Products*, fomenta la innovación y la competencia entre los fabricantes para el desarrollo de sus tecnologías. En las etiquetas energéticas pueden verse datos referentes al consumo energético anual o por ciclo en kilovatios-hora, así como pictogramas con información adicional del producto como su capacidad, nivel de ruido, consumos de agua, zona climática, etc. En el caso concreto de los equipos de climatización hay que tener en cuenta la fecha de fabricación del equipo, ya que antes la clasificación energética se hacía con una escala de colores y letras que iban de A+++ hasta G, pero desde marzo de 2021 según el Reglamento europeo 2017/1369 la escala de colores va de A hasta G (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021). También cambia la forma de cálculo de los

parámetros principales, por lo que no existe correspondencia entre las etiquetas antiguas y las actuales (Domínguez, 2022b). En la Figura 27 se muestra un ejemplo de una etiqueta genérica de una bomba de calor reversible en la que se indica el nombre de la marca fabricante (1), el modelo (2), el apartado de SEER indicando refrigeración (3), la carga de diseño en kW, el factor de eficiencia energética estacional SEER y el consumo anual de energía en kWh/año (4), los niveles de potencia acústica de las unidades tanto en el interior como en el exterior expresadas en decibelios o dB (5), el número de norma aplicada (6), el apartado de SCOP indicando modo calefacción (7), la valoración energética (8), la carga de diseño en kW, el factor de eficiencia energética estacional SCOP y el consumo anual de energía en kWh/año (9), y el mapa de Europa que indica las tres zonas climáticas de referencia para calefacción (10) para así poder leer adecuadamente los parámetros 8 y 9.

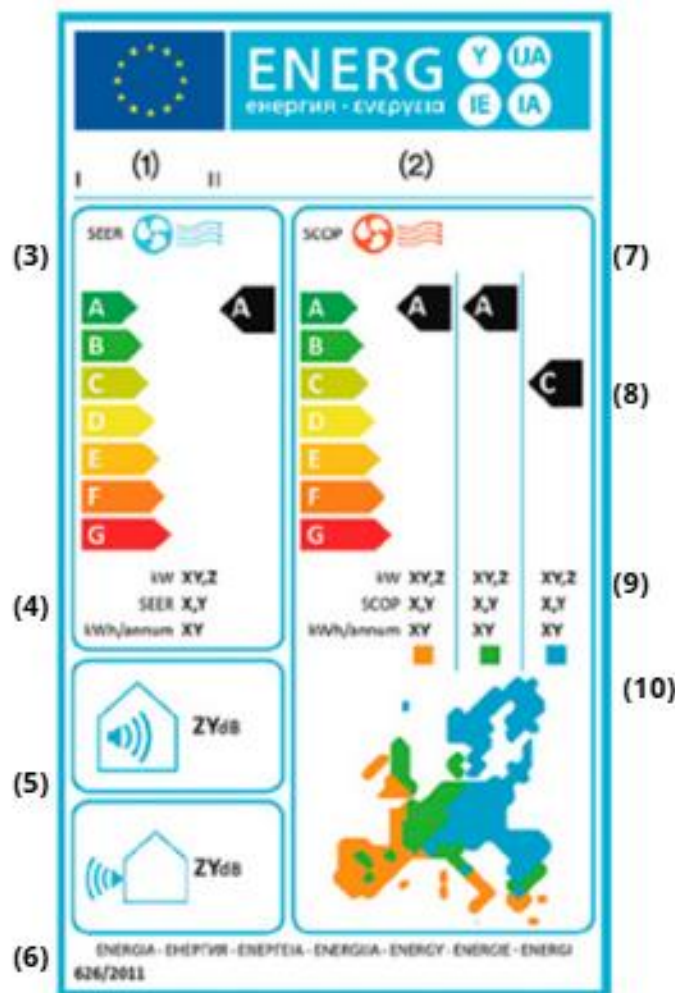


Figura 27: Ejemplo de etiqueta energética de una bomba de calor. Fuentes: (Domínguez, 2022b) y elaboración propia.

Cabe destacar que las etiquetas incluyen distinta información dependiendo del tipo de equipo ya que no es lo mismo un sistema que produzca ACS de otro que produzca también calefacción, o una caldera y una bomba de calor o un acumulador de ACS. (BAXI, s. f.). En el mercado también existen etiquetas para conjuntos o equipos combinados como la mostrada en la Figura 28.

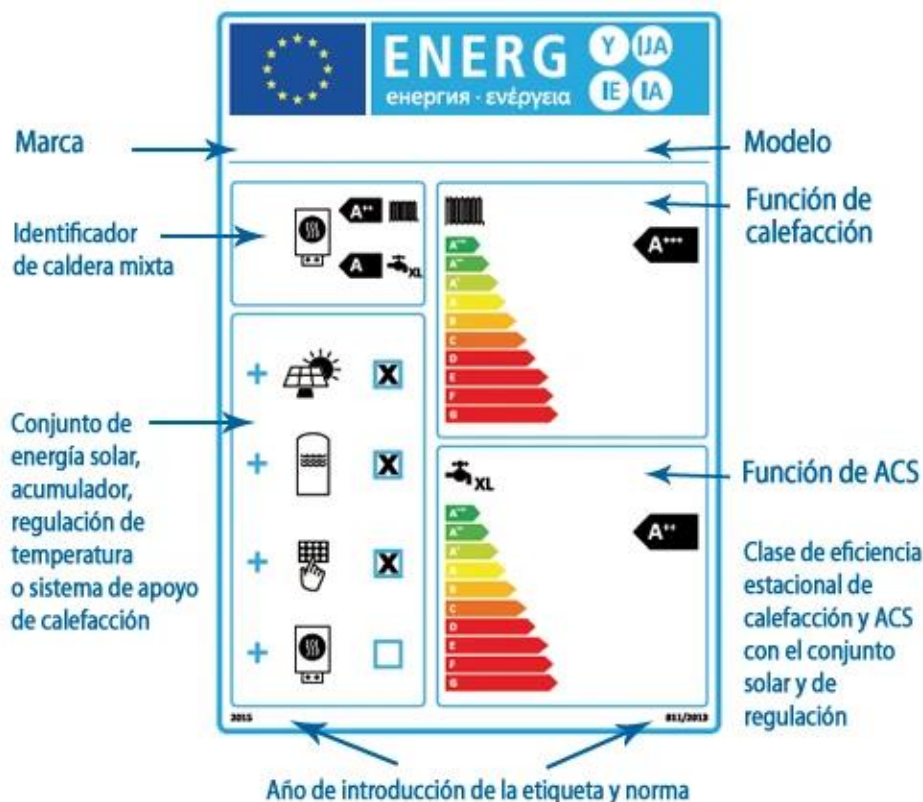


Figura 28: Etiqueta energética de equipos combinados. Fuente: (Arnabat, 2015)

2.4.2 Ayudas, subvenciones y beneficios fiscales

En el ámbito de la rehabilitación energética de viviendas unifamiliares del que trata este Trabajo de Fin de Máster, los gobiernos, tanto a nivel europeo o nacional como a nivel regional, han establecido diversas ayudas, subvenciones y/o beneficios fiscales a lo largo del tiempo cuya finalidad es fomentar la transición hacia sistemas más sostenibles y eficientes. En España, se destacan programas como el “Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia” (Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, s. f.-a), financiado por los fondos europeos “NextGenerationEU”, que contempla, entre otras muchas cosas, ayudas para la instalación de equipos de climatización renovable, como bombas de calor aerotérmicas, sistemas geotérmicos y paneles solares térmicos. Estas subvenciones pueden cubrir un porcentaje bastante significativo del coste de instalación, dependiendo del tipo de tecnología y del ahorro energético que suponga la intervención, e incluso en ciertas comunidades es posible que se ofrezcan planes adicionales de apoyo.

Además, existen beneficios fiscales (Agencia Tributaria, s. f.) en distintos impuestos como el Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas (conocido como IRPF) para actuaciones de mejora energética que reduzcan el consumo de energía no renovable en un determinado porcentaje, o el Impuesto de Bienes Inmuebles (conocido como IBI) en el cual a nivel autonómico y local en muchas comunidades es posible obtener bonificaciones para viviendas que integren

sistemas renovables. Los diversos programas de incentivos económicos no solo reducen las barreras financieras iniciales, que es lo que suele causar más rechazo y desinterés en la población, sino que también refuerza el compromiso de los hogares con la sostenibilidad energética y ambiental.

Al tratarse de programas temporales, pese a que suelen ir renovándose sus plazos, es recomendable consultar las referencias bibliográficas de este apartado para conocer a tiempo real qué recursos hay disponibles, así como los principales portales de las comunidades autónomas, de la localidad en cuestión, o del Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana que, por ejemplo, en fecha de este documento tiene diversas ayudas disponibles dentro del “Plan Estatal de acceso a la vivienda 2022-2025” (Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, s. f.-b).

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

3. DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA OBJETO DE ESTUDIO

En el presente apartado se pretende desarrollar un caso básico de estudio para la rehabilitación energética de climatización de una vivienda unifamiliar, analizando distintas opciones para mejorar su eficiencia térmica y optimizar el consumo de energía en climatización y ACS. A continuación, se va a describir una vivienda unifamiliar ficticia, con sistemas y equipos pertenecientes al denominado grupo de sistemas de climatización convencionales. Se establecen una serie de premisas e hipótesis de partida en las cuales se consideran las características esenciales del edificio, su ubicación con relación a su zona climática, y los sistemas existentes. Posteriormente, se evaluarán diferentes soluciones tecnológicas mediante la integración de energías renovables y la posible hibridación de sistemas de energía, siempre garantizando el confort térmico, con el objetivo de analizar el impacto energético y económico que suponen las medidas adoptadas.

3.1 Características de la vivienda objeto de estudio

Para definir la zona climática, se supone que la vivienda está situada en la localidad de Trescasas, provincia de Segovia, España, cuya situación se encuentra mostrada en la Figura 29.

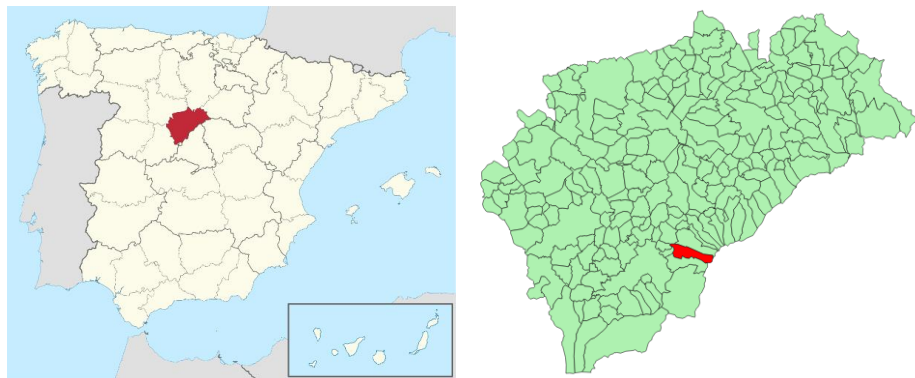


Figura 29: Situación geográfica de Trescasas, Segovia. Fuentes: (Wikipedia, s. f.-b) y (Wikipedia, s. f.-a).

Esta localidad corresponde a la zona climática E1 mostrada en la Figura 30 según el Anejo B “Zonas Climáticas” del Documento Básico HE del CTE (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2022a) encontrándose a una altitud de 1122 metros sobre el nivel del mar. La letra “E” implica que es una zona muy fría en invierno mientras que el número “1” quiere decir que tiene temperaturas suaves en verano.

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

Provincia	Altitud sobre el nivel del mar (h)																																			
	≤ 50 m	51 - 100 m	101 - 150 m	151 - 200 m	201 - 250 m	251 - 300 m	301 - 350 m	351 - 400 m	401 - 450 m	451 - 500 m	501 - 550 m	551 - 600 m	601 - 650 m	651 - 700 m	701 - 750 m	751 - 800 m	801 - 850 m	851 - 900 m	901 - 950 m	951 - 1000 m	1001 - 1050 m	1051 - 1100 m	1101 - 1150 m	1151 - 1200 m	1201 - 1250 m	1251 - 1300 m	≥ 1301 m									
Albacete	C3										D3										E1															
Alicante/Alacant	B4										C3					D3																				
Almería	A4		B4			B3					C3													D3												
Araba/Alava	D1										E1																									
Asturias	C1		D1										E1										E1													
Ávila	D2										D1																		E1							
Badajoz	C4										C3					D3																				
Baleares, Illes	B3															C3																				
Barcelona	C2					D2					D1										E1															
Bizkaia	C1															D1													E1							
Burgos	D1																				E1								E1							
Cáceres	C4																				D3								E1							
Cádiz	A3		B3					C3					C2					D2																		
Cantabria	C1		D1										E1										E1													
Castellón/Castelló	B3		C3										D3					D2								E1										
Ceuta											B3																									
Ciudad Real	C4										C3					D3																				
Córdoba	B4		C4										D3																							
Coruña, A	C1												D1													D3										
Cuenca	D1										D3										D2								E1							
Gipuzkoa	D1																				E1								E1							
Girona	C2		D2																				E1													
Granada	A4		B4					C4					C3					D3								E1										
Guadalajara											D3																		D2		E1					
Huelva	A4		B4		B3			C3																		D3										
Huesca	C3			D3					D2					E1								E1														
Jaén	B4										C4					D3								E1												
León											E1																									
Lleida	C3		D3																				E1													
Lugo	D1																				E1								E1							
Madrid	C3										D3										D2								E1							
Málaga	A3		B3					C3													D3															
Melilla											A3																									
Murcia	B3		C3																				D3													
Navarra	C2		D2					D1					E1										E1													
Ourense	C3			C2		D1					D2					E1								E1												
Palencia	D1																				E1								E1							
Palmas, Las	a3										A2										B2					C2										
Pontevedra	C1													D1										E1												
Rioja, La	C2		D2					D2										E1								E1										
Salamanca	D2																				E1								E1							
Santa Cruz de Tenerife	a3										A2										B2					C2										
Segovia	C3																																			
Sevilla	B4															C4													E1							
Soria	D2										D1										E1								E1							
Tarragona	B3		C3										D3										E1													
Teruel	C3										C2					D2										E1										
Toledo	C4																				D3								E1							
Valencia/València	B3		C3										D2										E1													
Valladolid	D2																				E1								E1							
Zamora	D2																				E1								E1							
Zaragoza	C3			D3										E1										E1												

Figura 30: Zonas climáticas de España según le CTE. Fuentes: (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2022a)

Debido a que en verano el clima es muy suave, no se considerará la instalación de ningún sistema para refrigeración.

La vivienda unifamiliar cuenta con 120 m² construidos, una terraza útil de 12 m² no calefactada y abierta y 80 m² útiles y calefactados distribuidos en dos plantas. En la primera planta hay una cocina, un dormitorio individual, un baño, un salón y un pasillo, además de la zona de escaleras, y en la segunda planta se tiene la zona de escaleras, un baño, un dormitorio individual, un dormitorio doble, un despacho y un pasillo. En la Figura 31 y en la Figura 32 se muestra un croquis de la distribución de la vivienda.

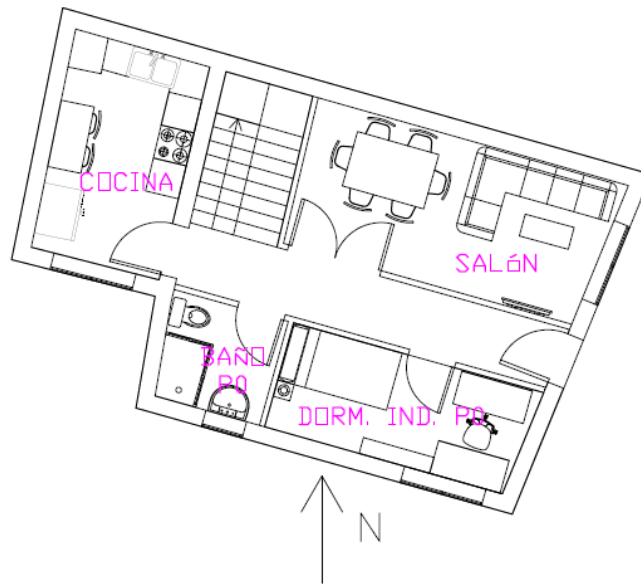


Figura 31: Distribución de la planta P0 de la vivienda. Fuente: elaboración propia.

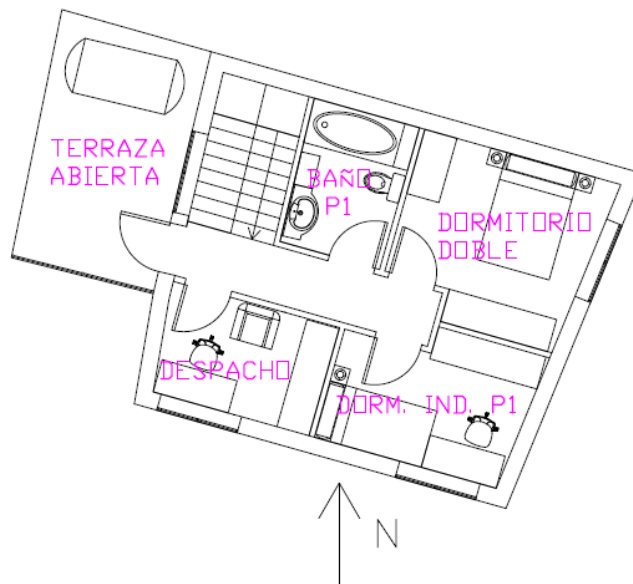


Figura 32: Distribución de la planta P1 de la vivienda. Fuente: elaboración propia.

Utilizando los datos provenientes de la “Guía técnica Condiciones climáticas exteriores de proyecto” (IDAE, 2010) se accede a los datos de la estación meteorológica de Segovia, de indicativo 2465, situada en el Observatorio de Segovia, en entorno ciudad a 1005 metros sobre el nivel del mar. Se requiere de realizar correcciones para obtener los datos de la localidad de Trescasas. Se estima un gradiente térmico troposférico en el que la temperatura desciende 0,65 °C cada 100 metros de altura, por lo que para el cálculo de las temperaturas en Trescasas se sigue la Ecuación 11.

$$T_{Trescasas} = T_{Segovia} - (z_{Trescasas} - z_{Segovia}) \cdot \frac{0,65^{\circ}\text{C}}{100 \text{ m}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Aplicando dicha ecuación se obtiene la temperatura necesaria para estimar la potencia de calefacción necesaria en las condiciones de proyecto más desfavorables y así dimensionar los equipos, seleccionando la temperatura de diseño de calefacción para un percentil 99% como indica la Guía del IDEA para viviendas. La humedad relativa coincidente no se corrige. Ambos datos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Condiciones proyecto calefacción (Temperatura seca exterior mínima) Fuente: (IDAE, 2010) y elaboración propia.

TS_99 Segovia (°C)	TS_99 Trescasas (°C)	HUMcoin (%)
-3,4	-4,1605	85,1

Con estos dos datos, y corrigiendo la presión (P_t) siguiendo la Ecuación 12 en función de la altura (z), se encuentra la temperatura de bulbo húmedo en el diagrama psicrométrico obtenido con el programa Sicro (Atecyr, s. f.).

$$P_t = 101325 \cdot (1 - z \cdot 2,255692 \cdot 0,00001)^{5,2559} \quad \text{Ecuación 12}$$

Por lo tanto, se dimensionan los equipos para una temperatura de bulbo húmedo de -4,8 °C, obtenida con el software de Atecyr. En el capítulo “4. Alternativas de rehabilitación energética” se explicará cómo se calcula la potencia necesaria del equipo de climatización.

Además, también se han obtenido las temperaturas medias mensuales mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7: Temperaturas medias mensuales del aire exterior en Segovia y en Trescasas: Fuentes: (IDAE, 2010) y elaboración propia.

Mes	Temperatura Segovia °C	Temperatura Trescasas °C
ENE	4,0	3,2
FEB	5,2	4,4
MAR	8,3	7,5
ABR	9,6	8,8
MAY	13,9	13,1
JUN	20,1	19,3
JUL	21,9	21,1
AGO	21,9	21,1
SEP	18,1	17,3
OCT	13,1	12,3
NOV	6,9	6,1
DIC	4,6	3,8

3.2 Demanda de ACS

El cálculo teórico de ACS se realiza teniendo en cuenta el Anejo F “Demanda de referencia de ACS” del Documento Básico HE del CTE (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2022a). Siguiendo dicho texto se indica unas necesidades de 28 litros al día por persona y a 60°C de temperatura con una ocupación correspondiente como mínimo a la establecida en la “tabla a” de dicho anejo, mostrada en la Figura 33.

Número de dormitorios	1	2	3	4	5	6	≥6
Número de Personas	1,5	3	4	5	6	6	7

Figura 33: Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado. Fuente: (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2022a)

Por lo tanto, se calcula una demanda mínima de 112 litros diarios para 4 personas de ocupación, lo que anualmente resulta un consumo de 40.880 litros de agua a 60°C.

En el mismo documento, en el Anejo G “Temperatura del agua de red”, aparecen los datos por capital de provincia en España de la temperatura diaria media mensual del agua fría. A esos datos hay que realizarles una corrección por altura para la localidad de Trescasas siguiendo la Ecuación 13.

$$T_{AFY} = T_{AFCP} - B \cdot A_z \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

T_{AFY} = temperatura media mensual de agua fría de la localidad donde se desea calcular

T_{AFCP} = temperatura media mensual de agua fría de la capital de provincia, obtenida de la tabla a-Anejo G;

B = coeficiente de valor 0,0066 para los meses de octubre a marzo y 0,0033 para el intervalo de abril a septiembre;

A_z = diferencia entre la altitud de la localidad y la de su capital de provincia

Por tanto, las temperaturas de agua fría quedan reflejadas en la Tabla 8 con los datos de altitud de 1002 metros para Segovia y 1122 metros para Trescasas.

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

Tabla 8: Temperatura media mensual de agua fría en °C para Segovia y Trecasas. Fuentes: (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2022a) y elaboración propia.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Segovia	6	7	8	10	12	15	18	18	15	12	8	6
Trecasas	5,21	6,21	7,21	9,60	11,60	14,60	17,60	17,60	14,60	11,21	7,21	5,21

Con estos datos se calcula mediante la Ecuación 14 la demanda térmica para conseguir el volumen de agua indicado con anterioridad a la temperatura de 60°C.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Ecuación 14

Donde:

Q = Demanda térmica requerida en Wh.

m = masa de agua a calentar en kg, teniendo en cuenta la densidad del agua $\rho=1\text{kg/L}$.

c = calor específico del agua (0,00116 kWh/kg · °C).

ΔT = diferencia de temperatura entre la Temperatura final (60 °C) y la temperatura del agua de la red en °C.

Los resultados obtenidos mensualmente son los que figuran en la Tabla 9 y en la Figura 34.

Tabla 9: Datos de la demanda de ACS Mensual. Fuente: Elaboración propia.

Mes	Días/mes	ΔT (°C)	Masa (kg)	Q(kWh)
ENE	31	54,79	3472	221,20
FEB	28	53,79	3136	196,15
MAR	31	52,79	3472	213,13
ABR	30	50,40	3360	196,89
MAY	31	48,40	3472	195,38
JUN	30	45,40	3360	177,36
JUL	31	42,40	3472	171,16
AGO	31	42,40	3472	171,16
SEP	30	45,40	3360	177,36
OCT	31	48,79	3472	196,98
NOV	30	52,79	3360	206,25
DIC	31	54,79	3472	221,20
TOTAL	365	-	40880	2344,24

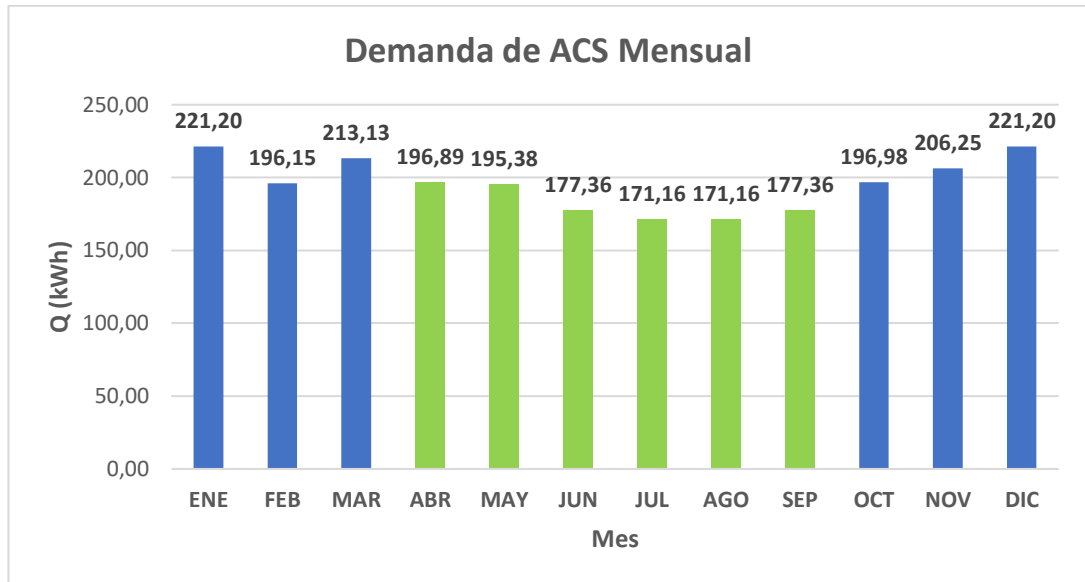


Figura 34: Gráfica de la demanda de ACS Mensual. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se requerirán 2.344 kWh de energía térmica para conseguir la demanda de 40.880 litros de agua anuales a 60°C.

3.3 Demanda de calefacción

Para la demanda de calefacción se ha realizado una estimación teniendo en cuenta las temperaturas medias mensuales y una temperatura de confort de 20°C en el interior, las pérdidas de la vivienda, el número de días del mes y el número de horas medio diario de uso de calefacción cada mes, obteniendo así los resultados de la Tabla 10 y la Figura 35. En los meses de junio, julio, agosto y septiembre no hay demanda de calefacción.

Tabla 10: Demanda de Calefacción. Fuente: Elaboración propia.

Mes	Demanda E. Térmica Calefacción (kWh)
ENE	1593,37
FEB	1342,31
MAR	906,83
ABR	528,84
MAY	177,17
JUN	0,00
JUL	0,00
AGO	0,00
SEP	0,00
OCT	390,09
NOV	968,38
DIC	1539,75
TOTAL	7446,74

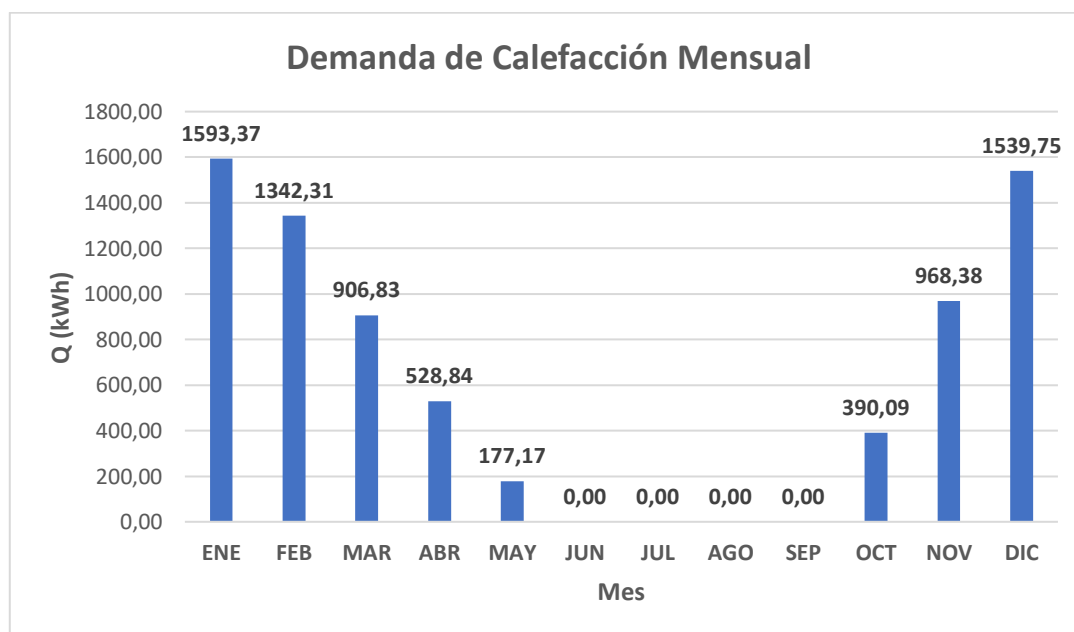


Figura 35: Gráfica de la demanda de Calefacción Mensual. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Consumo energético y costes de la instalación actual

La vivienda cuenta con una caldera de gasoil de 20 kW de ACS y calefacción, y una potencia eléctrica nominal de 200 W. Teniendo las demandas de ACS y de calefacción se requieren de los datos reflejados en la Tabla 11 para el cálculo del consumo de gasoil, de electricidad, y el coste de producir dicha energía.

Tabla 11: Parámetros necesarios para el cálculo de los consumos de la caldera de gasoil. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Valor	Unidad
PCI Gasoil	10	kWh/kg
Densidad Gasoil	0,8	kg/L
PCI Gasoil	8	kWh/L
Rendimiento Caldera	90	%
Precio Gasoil	1,256	€/L
Precio Luz	0,240	€/kWh
Consumo Luz	0,01	kWhEE/kWhET

Los precios del gasoil y de la luz son variables en el tiempo. El precio del gasoil varía considerablemente en función de los mercados, pero se ha decidido realizar el estudio el precio medio anual en 2025 para la zona de Segovia a fecha de marzo de 2025 (ClickGasoil, 2025). El precio de la luz también depende de los mercados, además de depender de la hora del día, por ello se ha considerado que las horas de funcionamiento de la calefacción serán horas punta de mañana o de tarde, con un precio medio de 0,240 €/kWh a fecha de 10 de marzo de 2025 según Red Eléctrica Española (Red Eléctrica Española, 2025). Evidentemente, todos los resultados de este estudio dependen significativamente de estos datos. Realizando los cálculos pertinentes los resultados quedan reflejados en la Tabla 12.

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

Tabla 12: Consumos y costes mensuales con la Caldera de Gasoil actual. Fuentes: elaboración propia.

Mes	Demanda E. Térmica ACS (kWh)	Demanda E. Térmica Calefacción (kWh)	Demanda E. Térmica Total (kWh)	Consumo de Gasoil (L)	Consumo de Gasoil (€)	Consumo E. Eléctrica Caldera (kWh)	Consumo E. Eléctrica Caldera (€)	Coste total (€)
ENE	221,20	1593,37	1814,57	252,02	316,54	20,16	4,84	321,38
FEB	196,15	1342,31	1538,46	213,68	268,38	17,09	4,10	272,48
MAR	213,13	906,83	1119,96	155,55	195,37	12,44	2,99	198,36
ABR	196,89	528,84	725,74	100,80	126,60	8,06	1,94	128,54
MAY	195,38	177,17	372,55	51,74	64,99	4,14	0,99	65,98
JUN	177,36	0,00	177,36	24,63	30,94	1,97	0,47	31,41
JUL	171,16	0,00	171,16	23,77	29,86	1,90	0,46	30,31
AGO	171,16	0,00	171,16	23,77	29,86	1,90	0,46	30,31
SEP	177,36	0,00	177,36	24,63	30,94	1,97	0,47	31,41
OCT	196,98	390,09	587,07	81,54	102,41	6,52	1,57	103,98
NOV	206,25	968,38	1174,64	163,14	204,91	13,05	3,13	208,04
DIC	221,20	1539,75	1760,95	244,58	307,19	19,57	4,70	311,88
TOTAL	2344,24	7446,74	9790,98	1359,86	1707,98	108,79	26,11	1.734,09

4. ALTERNATIVAS DE REHABILITACIÓN ENERGÉTICA

Para la rehabilitación de esta vivienda se proponen la sustitución únicamente de la caldera de gasoil por las alternativas que se mencionarán a continuación. Si se consigue demostrar una gran rentabilidad sin cambiar los elementos emisores, cabe pensar que, si se sustituyen por otros mucho más eficientes, especialmente en la bomba de calor, la inversión inicial será mayor, pero el ahorro mensual también aumentará. En este estudio se valorará solamente el caso básico de sustitución de equipos productores, donde los emisores serán radiadores de aluminio que pueden trabajar a 55 °C.

Para poder seleccionar los equipos para la rehabilitación se precisa conocer la potencia mínima necesaria que han de tener. Para ello se debe calcular la potencia necesaria de calefacción en las condiciones más desfavorables de calefacción y la potencia necesaria en las condiciones más desfavorables de ACS.

Para la potencia necesaria en ACS se realiza el cálculo siguiendo la Ecuación 15.

$$P_{ACS} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- **m** es la masa de agua a calentar. Se considerará la producción de la necesidad diaria de 112L.
- **c** es el calor específico del agua de valor 1,16 Wh/(kg · °C)
- **ΔT** es la diferencia de temperatura entre la deseada, que en este caso son 60 °C, y la del agua fría de red, que se ha considerado de 5,21 °C al ser el caso más frío mencionado anteriormente, correspondiente a los meses de enero o de diciembre.
- **t** es el tiempo en el que se requiere producir los 112 L a 60 °C. Se ha considerado 1 hora como valor estándar.

Realizando el cálculo se obtiene un valor de 7,13 kW de potencia.

El cálculo de la potencia de calefacción es considerablemente más complejo. Su cálculo es la suma de las pérdidas de calor por transmisión y por ventilación con las condiciones exteriores de proyecto más desfavorables.

Para las pérdidas por transmisión se sigue la Ecuación 16.

$$P_{Transmisión} = U \cdot A \cdot \Delta T \cdot C_1 \cdot C_2 \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- **U** es la transmitancia o coeficiente de transmisión térmica de las distintas superficies. Los valores tenidos en cuenta se muestran en la Tabla 13.
- **A** es el área de la superficie a calcular. Se valoran las superficies mostradas en la Tabla 13 de transmitancias.
- **ΔT** es la diferencia de temperatura entre la deseada para el confort interior, que en este caso se ha considerado de 20 °C, y la exterior de proyecto en las condiciones más desfavorables calculada previamente en el apartado “3.1 Características de la vivienda objeto de estudio” de -4,9 °C. Entre una zona climatizada interior y una zona sin climatizar exterior se tomará dicha diferencia. Entre una zona climatizada interior y una zona sin climatizar interior se tomará la mitad de dicha diferencia, ya que las viviendas o locales anexos separados por medianerías (como es el caso), techos o suelos se consideran zonas interiores sin climatizar. Entre dos zonas climatizadas interiores ΔT es de valor unidad.
- **C₁** es el coeficiente intermitencia que representa un incremento de la carga térmica producido por paradas programadas del sistema relacionado con la inercia térmica y la demora hasta alcanzar la temperatura de consigna. Se ha considerado un valor de 1,1, es decir, un 10% más.
- **C₂** es el coeficiente de orientación que se aplica a los cerramientos y que se trata en un porcentaje de incremento sobre la carga térmica con valores de 1,2 para orientación Norte, 1 para orientación Sur y 1,1 para orientación Este-Oeste. En el caso de medianerías, paredes o puertas interiores se ha considerado un valor de 1.

Tabla 13: Valores de Transmitancias para las distintas superficies tomados para los cálculos. Fuente: elaboración propia.

Superficie	U (Kcal/(h·m ² ·K))	U (kW/m ² ·K)
Suelo	0,8	0,00093
Forjado	0,8	0,00093
Techo	1	0,00116
Pared Exterior	1	0,00116
Medianería	1	0,00116
Pared Interior	1,6	0,00186
Puertas Exterior	2	0,00232
Ventanas	2,5	0,00291
Puertas Interior	2	0,00232
Factor Conversión kcal/h a kW		0,00116

Para el cálculo de las pérdidas por ventilación se debe seguir la Ecuación 17.

$$P_{Ventilación} = P_e \cdot C_e \cdot V \cdot \Delta T$$

Ecuación 17

Donde:

- P_e es el peso específico del aire de valor 1,2 kg/m³.
- C_e es el calor específico del aire de valor 0,24 kCal/(kg · °C) o 0,28 Wh/(kg · °C)
- V es el caudal de aire de renovación en m³/h. Del Código Técnico de Edificación (CTE), Sección HS-3, Calidad del aire interior, se extraen los valores necesarios para el cálculo del caudal de ventilación (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2022b) donde la extracción realiza en cuartos húmedos, como la cocina o los baños, y la renovación por cuartos secos como el salón, los dormitorios o el despacho. El aire extraído y el renovado deben de ser iguales, por lo que una vez calculados los caudales se han equilibrado, concretamente los de renovación, en función de los metros cuadrados de cada habitación.
- ΔT es la diferencia de temperatura entre la deseada para el confort interior, que en este caso se ha considerado de 20 °C, y la exterior de proyecto en las condiciones más desfavorables calculada previamente en el apartado “3.1 Características de la vivienda objeto de estudio” de -4,9 °C.

Todos los cálculos han sido realizados con los correspondientes cambios de unidades para obtener los valores finales en kW.

Una vez obtenidos los valores de las pérdidas por transmisión y por ventilación, se calcula la potencia necesaria de calefacción en las condiciones más desfavorables como la suma de ambas siguiendo la Ecuación 18.

$$P_{Calefacción} = P_{Transmisión} + P_{Ventilación}$$

Ecuación 18

Se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 14 de a modo de resumen. Sumando ambas potencias de ACS y de calefacción se obtiene un valor mínimo de 16,5 kW para la producción simultánea en las condiciones más desfavorables. En el caso de disponer de un acumulador o preferir que la producción de calefacción sea detenida mientras se utiliza el ACS, la potencia mínima deberá ser la mayor, que corresponde a 9,3 kW en calefacción. Debido a las eficiencias de los posibles sistemas, un pequeño margen de seguridad y la disponibilidad de la potencia de los sistemas en el mercado conviene considerar una pequeña cantidad de potencia a mayores.

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

Tabla 14: Potencia necesaria de calefacción. Fuente: elaboración propia.

Planta	Habitación	Ptransmisión (kW)	Pventilación (kW)	Ptotal (kW)
Planta P0		3,520	0,706	4,226
	Salón	0,945	0,444	1,389
	Baño P0	0,524	0,000	0,524
	Dormitorio Individual P0	0,825	0,262	1,087
	Cocina	0,818	0,000	0,818
	Pasillo	0,407	0,000	0,407
Planta P1		3,633	0,752	4,386
	Dormitorio Individual P1	1,016	0,247	1,263
	Dormitorio Doble	1,009	0,321	1,329
	Despacho	0,842	0,185	1,027
	Baño P1	0,335	0,000	0,335
	Pasillo	0,431	0,000	0,431
Escaleras		0,710	0,000	0,710
	Escaleras	0,710	0,000	0,710
TOTAL		7,864	1,458	9,322

4.1 Propuesta de rehabilitación con caldera de biomasa

Para la caldera de biomasa se ha decidido instalar un equipo de producción simultánea de ACS y calefacción. El equipo elegido ha sido la caldera de pellets CBP 18 Matic de la marca BAXI, de potencia térmica nominal 18,7 kW, superior a los 16,5 kW mencionados anteriormente, y potencia eléctrica nominal de 150 W. A continuación, en la Tabla 15 se muestran los principales parámetros para el cálculo de los consumos.

Tabla 15: Parámetros necesarios para el cálculo de los consumos de la caldera de pellets. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Valor	Unidad
PCI Pellet	4,8	kWh/kg
Rendimiento Caldera	90	%
Precio Pellet	0,41	€/kg
Precio Luz	0,240	€/kWh
Consumo Luz	0,008	kWhEE/kWhET

Con estos valores, se calculan los datos de consumo de la Tabla 16.

Tabla 16: Consumos y costes con la caldera de pellets escogida. Fuente: elaboración propia.

Mes	Demanda E. Térmica ACS (kWh)	Demanda E. Térmica Calefacción (kWh)	Demanda E. Térmica Total (kWh)	Consumo Pellets (kg)	Consumo Pellets (€)	Consumo E. Eléctrica Caldera (kWh)	Consumo E. Eléctrica Caldera (€)	Coste total (€)
ENE	221,20	1593,37	1814,57	420,04	172,22	16,17	3,88	176,10
FEB	196,15	1342,31	1538,46	356,13	146,01	13,71	3,29	149,30
MAR	213,13	906,83	1119,96	259,25	106,29	9,98	2,40	108,69
ABR	196,89	528,84	725,74	167,99	68,88	6,47	1,55	70,43
MAY	195,38	177,17	372,55	86,24	35,36	3,32	0,80	36,15
JUN	177,36	0,00	177,36	41,06	16,83	1,58	0,38	17,21
JUL	171,16	0,00	171,16	39,62	16,24	1,53	0,37	16,61
AGO	171,16	0,00	171,16	39,62	16,24	1,53	0,37	16,61
SEP	177,36	0,00	177,36	41,06	16,83	1,58	0,38	17,21
OCT	196,98	390,09	587,07	135,90	55,72	5,23	1,26	56,97
NOV	206,25	968,38	1174,64	271,91	111,48	10,47	2,51	113,99
DIC	221,20	1539,75	1760,95	407,63	167,13	15,69	3,77	170,89
TOTAL	2344,24	7446,74	9790,98	2266,43	929,24	87,26	20,94	950,18

4.2 Propuesta de rehabilitación con bomba de calor aire-agua

En el caso de las bombas de calor reversibles, se requiere acudir a la Instrucción Técnica del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios IT 1.2.4.1.3.3 “Maquina frigorífica enfriada por aire” (Ministerio de la Presidencia BOE, 2007) donde se indica que “cuando las máquinas sean reversibles, la temperatura mínima de diseño será la húmeda del nivel percentil más exigente menos 2°C”. Por ello, la potencia de calefacción para el dimensionamiento se muestra en la Tabla 17, que, pese a que no se está considerando la acción de refrigeración en verano con el equipo, este sí será reversible.

Tabla 17: Potencia necesaria de calefacción con bomba de calor reversible. Fuente: elaboración propia.

Planta	Habitación	Ptransmisión (kW)	Pventilación (kW)	Ptotal (kW)
Planta P0		3,789	0,763	4,552
	Salón	1,018	0,479	1,498
	Baño P0	0,565	0,000	0,565
	Dormitorio Individual P0	0,889	0,283	1,173
	Cocina	0,883	0,000	0,883
	Pasillo	0,434	0,000	0,434
Planta P1		3,912	0,813	4,725
	Dormitorio Individual P1	1,096	0,267	1,362
	Dormitorio Doble	1,087	0,347	1,434
	Despacho	0,908	0,200	1,108
	Baño P1	0,359	0,000	0,359
	Pasillo	0,462	0,000	0,462
Escaleras		0,765	0,000	0,765
	Escaleras	0,765	0,000	0,765
TOTAL		8,467	1,576	10,042

De nuevo, se elige un equipo con potencia superior a la calculada. En este caso el modelo elegido ha sido la aerotermia aire-agua de la marca Ferroli modelo bibloc 12 Omnia ST 3.2 con acumulador de 240 L y refrigerante R32, con una potencia de 11,9 kW. A continuación, en la Tabla 18 se muestran los principales parámetros para el cálculo de los consumos, elegidos para las condiciones de operación necesarias y en función de la zona climática correspondiente en europea.

Tabla 18: Parámetros necesarios para el cálculo de los consumos de la bomba de calor. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Valor	Unidad
SCOP Calefacción (55°C)	3,45	kWh Térmicos/kWh eléctricos
SCOP DHW (ACS)	3,21	kWh Térmicos/kWh eléctricos
Precio Luz	0,240	€/kWh

Con estos valores, se calculan los datos de consumo de la Tabla 19.

Tabla 19: Consumos y costes con la bomba de calor escogida. Fuente: elaboración propia.

Mes	Demanda E. Térmica ACS (kWh)	Demanda E. Térmica Calefacción (kWh)	Demanda E. Térmica Total (kWh)	Consumo E. Eléctrica BdC (kWh)	Consumo E. Eléctrica BdC (€)	Coste total (€)
ENE	221,20	1593,37	1814,57	530,76	127,38	127,38
FEB	196,15	1342,31	1538,46	450,18	108,04	108,04
MAR	213,13	906,83	1119,96	329,25	79,02	79,02
ABR	196,89	528,84	725,74	214,62	51,51	51,51
MAY	195,38	177,17	372,55	112,22	26,93	26,93
JUN	177,36	0,00	177,36	55,25	13,26	13,26
JUL	171,16	0,00	171,16	53,32	12,80	12,80
AGO	171,16	0,00	171,16	53,32	12,80	12,80
SEP	177,36	0,00	177,36	55,25	13,26	13,26
OCT	196,98	390,09	587,07	174,43	41,86	41,86
NOV	206,25	968,38	1174,64	344,94	82,79	82,79
DIC	221,20	1539,75	1760,95	515,22	123,65	123,65
TOTAL	2344,24	7446,74	9790,98	2888,77	693,30	693,30

4.3 Propuesta de rehabilitación con bomba de calor aire-agua + paneles fotovoltaicos

En este tercer y último caso se propone la hibridación de la bomba de calor anterior con paneles fotovoltaicos para cubrir la demanda eléctrica. Como es evidente, la producción será mayor en verano que en invierno, por lo que con las placas solares cabe la posibilidad de que algún mes no se pueda cubrir la demanda y en otros meses sobre. En los meses que falte energía eléctrica se recurrirá a la red eléctrica, y en los meses que sobre se aportará a la vivienda para cubrir la energía de la casa en el día a día. Lo interesante para el cálculo es que en el cómputo total del año se cubra la demanda de la bomba de calor.

Se parte de una demanda de energía eléctrica 2888,77 kWh/año que, haciendo el promedio, son 7,91 kWh/día. Para la provincia de Segovia se tienen 3024 horas de sol al día y 5,02 horas de sol pico o HSP (POWEN, 2023), que se considera como valores válidos para Trescasas. Considerando una eficiencia del 080% del sistema de paneles, inversor, cableado, etc., y siguiendo la Ecuación 19 se obtiene una potencia necesaria a instalar de 1,97 kW.

$$P_{necesaria} = \frac{\text{Demanda Media Electricidad Diaria}}{HSP \cdot \eta} \quad \text{Ecuación 19}$$

Los paneles elegidos son de 450 W. Estos paneles tienen unas dimensiones de 1800 mm x 1134 mm. Para cubrir la potencia necesaria de manera teórica son necesarios 4,37 paneles, por lo que la instalación requerirá de 5 paneles, que en su conjunto tendrán un área total de instalación de 10,206 m². Con 5 paneles se obtiene una potencia máxima de 2,25 kW. Se ha escogido el modelo de panel Ja Solar 450W 24V Monocristalino Perc y el inversor Huawei SUN2000-2KTL-L1 de 2000W de potencia de salida nominal y 3000 Wp de potencia fotovoltaica máxima, teniendo en cuenta que la intensidad de los paneles no debe ser mayor que la del inversor para no desperdiciar energía. Los paneles requieren de un mantenimiento anual. Mediante la herramienta PVGIS (European Commission, s. f.), se ha estimado la producción solar con la obtención de los resultados mostrados en la Tabla 20.

Tabla 20: Resultados de la simulación de producción eléctrica solar con PVGIS. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Valor	Unidad
Ángulo de inclinación óptimo	34	°
Ángulo de azimut óptimo	-4	°
Producción anual FV	2939,31	kWh
Irradiación anual	1778,62	KWh/m ²
Variación interanual	141,44	kWh
Cambios en la producción debido a:		
Ángulo de incidencia	-2,23	%
Efectos espectrales	0,9%	%
Temperatura y baja irradiancia	-6,27	%
Pérdidas totales	-26,55	%

En la Tabla 21 se encuentra una comparativa de la demanda y de la producción por meses, donde se observa que el total anual queda cubierto. En la Figura 36 se observa que la mayor producción es en verano y el mayor consumo en invierno, como es lógico.

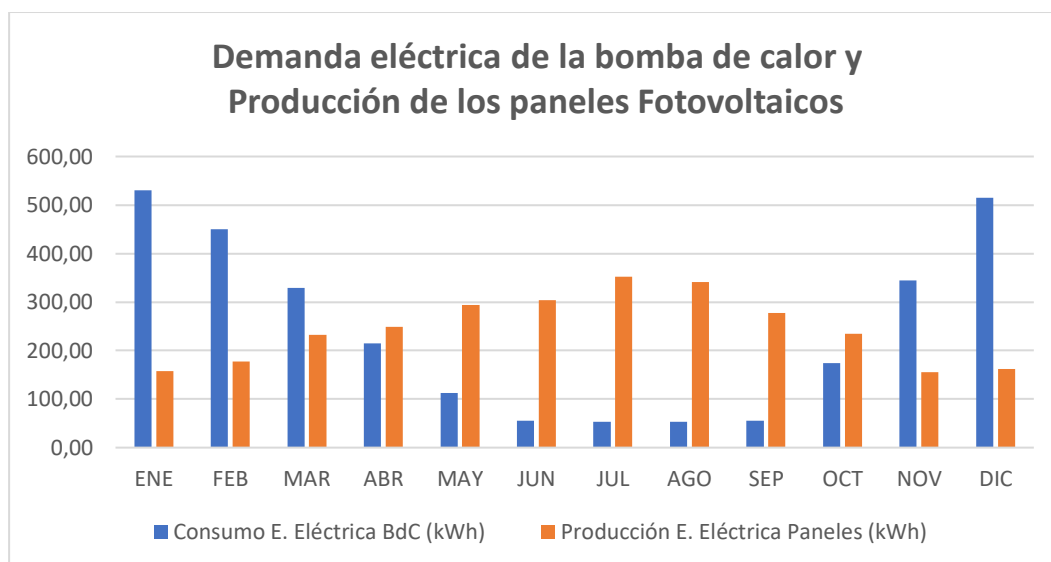


Figura 36: Demanda eléctrica de la bomba de calor y Producción de los paneles Fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

Tabla 21: Demanda eléctrica de la bomba de calor y Producción de los paneles Fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia.

Mes	Consumo E. Eléctrica BdC (kWh)	Producción E. Eléctrica Paneles (kWh)
ENE	530,76	157,7
FEB	450,18	177,5
MAR	329,25	231,9
ABR	214,62	249,4
MAY	112,22	294,5
JUN	55,25	304,3
JUL	53,32	352,7
AGO	53,32	341
SEP	55,25	277
OCT	174,43	235,1
NOV	344,94	155,5
DIC	515,22	161,8
TOTAL	2888,77	2938,4

5. ANÁLISIS ENERGÉTICO, MEDIOAMBIENTAL Y ECONÓMICO

5.1 Análisis energético

En el ámbito energético, la demanda térmica es igual para todos los sistemas, pero la manera en que se consigue esa energía es distinta entre ellos, y queda reflejado en la Tabla 22. Claramente la bomba de calor tiene un consumo eléctrico más alto que las demás, pero a cambio se elimina la combustión de cualquier combustible de manera directa. Evidentemente si se le añaden paneles fotovoltaicos esta energía es gratuita y 100% renovable. Comparando las dos calderas de combustión, la energía eléctrica es dependiente del consumo de los modelos elegidos, por lo que la diferencia relevante radica en el tipo de combustible y sus consecuencias medioambientales.

MES	Demanda E. Térmica Total (kWh)	Caldera de Gasoil		Caldera de Pellets		Bomba de calor
		Consumo de Gasoil (L)	Consumo E. Eléctrica Caldera Gasoil (kWh)	Consumo Pellet (kg)	Consumo E. Eléctrica Caldera Pellets (kWh)	Consumo E. Eléctrica BdC (kWh)
ENE	1814,57	252,02	20,16	420,04	16,17	530,76
FEB	1538,46	213,68	17,09	356,13	13,71	450,18
MAR	1119,96	155,55	12,44	259,25	9,98	329,25
ABR	725,74	100,80	8,06	167,99	6,47	214,62
MAY	372,55	51,74	4,14	86,24	3,32	112,22
JUN	177,36	24,63	1,97	41,06	1,58	55,25
JUL	171,16	23,77	1,90	39,62	1,53	53,32
AGO	171,16	23,77	1,90	39,62	1,53	53,32
SEP	177,36	24,63	1,97	41,06	1,58	55,25
OCT	587,07	81,54	6,52	135,90	5,23	174,43
NOV	1174,64	163,14	13,05	271,91	10,47	344,94
DIC	1760,95	244,58	19,57	407,63	15,69	515,22
TOTAL	9790,98	1359,86	108,79	2266,43	87,26	2888,77

Tabla 22: Consumos energéticos de los distintos sistemas. Fuente: elaboración propia.

5.2 Análisis medioambiental

En el presente apartado se tratará de realizar un análisis cuantitativo y cualitativo del ahorro energético derivado de la transición a energías renovables en el caso de estudio.

La energía térmica demandada es constante ya que son los requerimientos de la vivienda, pero difiere la forma en que se produce. Se aplicarán la Ecuación 2 y la Ecuación 3 mencionada en el apartado 2.1 “Principios básicos de eficiencia energética”, las cuales se repiten de nuevo para recordarlas y tenerlas presentes en la Ecuación 20 y en la Ecuación 21.

$$Emisiones Directas CO_2 = \frac{E_{térmica\ demandada}}{PCI \cdot \eta_{sistema}} \cdot FE_{combustible} \quad Ecuación\ 20$$

$$Emisiones Indirectas CO_2 = E_{eléctrica} \cdot FE_{eléctrica} \quad Ecuación\ 21$$

Donde:

- **$E_{térmica\ demandada}$** es la energía térmica demandada por el sistema (kWh).
- **PCI** es el poder calorífico inferior del combustible (kWh/kg).
- **$\eta_{sistema}$** es la eficiencia del sistema en la conversión de energía.
- **$FE_{combustible}$** es el factor de emisión del combustible utilizado (kg CO₂/kg).
- **$E_{eléctrica}$** es el consumo eléctrico del sistema (kWh).
- **$FE_{electricidad}$** es el factor de emisión de la electricidad, que varía según el mix energético de cada país (kg CO₂/kWh).

Las emisiones directas de CO₂e aparecen representadas en la Tabla 23, tomando como valores para el factor de emisión del combustible 2,721 para el gasoil y 0,171 para los pellets (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, 2024). Es evidente que para el caso de la bomba de calor estas serán nulas, y resulta destacable la reducción de entorno a un 90% de las emisiones de la transición de gasoil a pellets debido a su factor de emisión de combustible. Se podría considerar que las emisiones de los pellets son también nulas por su origen biogénico, pero se ha decidido incluirlas en el estudio.

Tabla 23: Emisiones Directas de CO₂e para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Energía térmica demandada (kWh/año)	PCI (kWh/L o kWh/kg)	Rendimiento sistema	Factor emisión combustible kgCO ₂ e/ud	Emisiones CO ₂ e Directas (kg/año)
Caldera Gasoil	9790,98	8	0,9	2,721	3700,18
Caldera Pellets	9790,98	4,8	0,9	0,171	387,56
Bomba de Calor	9790,98	N/A	N/A	N/A	0
BdC. + Paneles FV	9790,98	N/A	N/A	N/A	0

A continuación, en la Tabla 24 se presentan los resultados de las emisiones indirectas de CO₂e. El factor de emisión de electricidad es muy variable debido a la cambiante producción del mix energético español. Por ello, se ha considerado el valor publicado más reciente de 0,260 kgCO₂e/kWh para el año 2023 (Generalitat de Catalunya, 2024) al no haberse publicado aún el dato del año 2024. Como cabía esperar el valor más alto es para la bomba de calor.

Tabla 24: Emisiones Indirectas de CO₂e para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	E eléctrica consumida (kWh/año)	Factor emisión electricidad* kgCO ₂ e/kWh	Emisiones CO ₂ e Indirectas (kg/año)
Caldera Gasoil	108,79	0,260	28,29
Caldera Pellets	87,26	0,260	22,69
Bomba de Calor	2888,77	0,260	751,08
BdC. + Paneles FV	2888,77	N/A	0

Una vez obtenidas las emisiones directas e indirectas se obtiene mediante la suma de ambas el valor de las emisiones de CO₂e totales anualmente de cada sistema, mostradas en la Tabla 25. Se observan una reducción del 90% con el cambio a caldera de pellets y de un 80% utilizando bomba de calor, ambas respecto a la caldera de gasoil instalada.

Tabla 25: Emisiones Totales de CO₂e para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Emisiones CO ₂ e Directas (kg/año)	Emisiones CO ₂ e Indirectas (kg/año)	Emisiones CO ₂ e totales (kg/año)	Emisiones CO ₂ e totales (t/año)
Caldera Gasoil	3700,18	10,88	3711,05	3,73
Caldera Pellets	387,56	8,73	396,29	0,41
Bomba de Calor	0	288,88	288,88	0,75
BdC. + Paneles FV	0	0	0	0

Para el caso concreto de la bomba de calor, se puede aplicar la Ecuación 22 para el cálculo de la energía renovable, extraída de la Directiva UE 2018/2001

relativa al fomento del uso de la energía procedente de fuentes renovables (Parlamento Europeo y del Consejo, 2018), obteniendo así los datos mostrados en la Ecuación 22 tiene la siguiente consideración según la Directiva 2008/2001:

- El calor útil total estimado (**Q_{usable}**) proporcionado por bombas de calor tiene la siguiente restricción: solo se tendrán en cuenta las bombas de calor para las que **SPF > 1.15 * 1/η**, donde **SPF** es el factor de rendimiento medio estacional estimado para dichas bombas de calor (**SCOOP_{Calefacción}**, **SCOOP_{DHW}**, **SEER**), y **η** es el cociente entre la producción total bruta de electricidad y el consumo primario de energía para la producción de electricidad, y se calculará como una media de la Unión basada en datos de Eurostat.

Tomando para el valor $\eta = 0,42$ en el caso de España, se deberá tener como mínimo un SPF de 2,76, por lo que esta bomba de calor sí aplica a la Ecuación 22.

Tabla 26.

$$E_{Renovable} = Q_{Usable\ Calefacción} \cdot \left(1 - \frac{1}{SCOP_{Calefacción}}\right) + Q_{Usable\ ACS} \cdot \left(1 - \frac{1}{SCOP_{DHW}}\right) \quad \text{Ecuación 22}$$

La Ecuación 22 tiene la siguiente consideración según la Directiva 2008/2001:

- El calor útil total estimado (**Q_{usable}**) proporcionado por bombas de calor tiene la siguiente restricción: solo se tendrán en cuenta las bombas de calor para las que **SPF > 1.15 * 1/η**, donde **SPF** es el factor de rendimiento medio estacional estimado para dichas bombas de calor (**SCOOP_{Calefacción}**, **SCOOP_{DHW}**, **SEER**), y **η** es el cociente entre la producción total bruta de electricidad y el consumo primario de energía para la producción de electricidad, y se calculará como una media de la Unión basada en datos de Eurostat.

Tomando para el valor $\eta = 0,42$ en el caso de España, se deberá tener como mínimo un SPF de 2,76, por lo que esta bomba de calor sí aplica a la Ecuación 22.

Tabla 26: Cantidad de energía renovable en el caso de la Bomba de Calor. Fuente: elaboración propia.

Q usable calefacción (kWh/año)	SCOP calefacción	Q usable ACS (kWh/año)	SCOP DHW	Energía renovable (kWh/año)	Energía renovable (%)
7446,74	3,45	2344,24	3,21	6902,21475	70,50%

Este resultado, refuerza el hecho de que, como mínimo, se obtiene un 70,50% de energía renovable, procedente en este caso del aire exterior. Con cualquiera de las opciones de rehabilitación aplicadas hay una reducción total del consumo de combustibles fósiles, e incluso si se considerase, como se ha hecho, las emisiones directas de los pellets, los valores sufren una reducción drástica.

Además, en el caso de la bomba de calor, el consumo pasa a ser plenamente eléctrico. Si además se considera el tercer caso de bomba de calor con paneles fotovoltaicos, las emisiones de CO₂ son nulas y el porcentaje de energía renovable es del 100%.

Además, la bomba de calor utiliza refrigerante R-32. En este caso son 1,84 kilogramos con un GWP de 675. Esto equivale a 1,24 toneladas equivalentes de CO₂ si se liberase a la atmósfera, lo cual no tiene por qué pasar si no hay fugas y su eliminación tras la vida útil del sistema es correcta. Este valor, en caso de liberarse a la atmósfera representa una tercera parte de las emisiones de CO₂ de la caldera de gasoil en un solo año, y en comparación con la caldera de pellets, solamente con cuatro años de funcionamiento se alcanzaría el valor del R-32. La bomba de calor cuenta con un impuesto sobre los Gases Fluorados de Efecto Invernadero (GFEI) de 18,63€ ya incluido en su propio PVP, por utilizar un refrigerante con GWP superior a 150.

5.3 Análisis económico: Coste de los nuevos sistemas renovables

Para los costes de instalación de las distintas tecnologías se ha calculado un presupuesto, el cual se encuentra resumido con las principales partidas en la Tabla 27, en la Tabla 28 y en la Tabla 29, y con el coste de la inversión total inicial en la Tabla 30. Cada partida está compuesta del coste de los materiales necesarios si procede, de la mano de obra en función de las horas trabajadas y un 2% a mayores en concepto de costes directos complementarios. Las bases de datos de precios han sido extraídas del programa Arquímedes y de las páginas webs de las tiendas de Leroy Merlin, GasFrioCalor, EcoFener y Autosolar.

Tabla 27: Precio de Instalación de la Opción 1 - Caldera de Biomasa. Fuente: Elaboración Propia

Partida	Concepto	€
Desmontaje de equipo de Calefacción y ACS para sustitución por equipo con mejor eficiencia energética	Desmontaje de equipo mixto de calefacción y producción de ACS formado por caldera convencional de gasóleo, doméstica, de pie, de 20kW de potencia calorífica máxima y soportes de fijación con medios manuales mecánicos y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.	162,93
Instalación Caldera de biomasa para la combustión de Pellets	Rehabilitación energética mediante la colocación, en sustitución de equipo existente, de caldera para la combustión de pellets, con potencia nominal de 18,7kW de la marca BAXI modelo CBP 18 Matic.	5.386,04
TOTAL INVERSIÓN INICIAL OPCIÓN 1		5.548,97

Hacia una vivienda sostenible:
Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

Tabla 28: Precio de Instalación de la Opción 2 - Bomba de calor aire - agua. Fuente: Elaboración Propia

Partida	Concepto	€
Desmontaje de equipo de Calefacción y ACS para sustitución por equipo con mejor eficiencia energética	Desmontaje de equipo mixto de calefacción y producción de ACS formado por caldera convencional de gasóleo, doméstica, de pie, de 20kW de potencia calorífica máxima y soportes de fijación con medios manuales mecánicos y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.	162,93
Unidad aire-agua bomba de calor reversible, para instalación en interior.	Rehabilitación energética mediante la colocación, en sustitución de equipo existente, de bomba de calor aerotermica aire-agua reversible de la marca Ferroli modelo bibloc 12 Omnia ST3.2 con acumulador de 240L, R-32, potencia 11,9kW.	6.756,91
TOTAL INVERSIÓN INICIAL OPCIÓN 2		6.919,84

Tabla 29: Precio de Instalación de la Opción 3 - Bomba de calor aire-agua + Paneles Fotovoltaicos. Fuente: Elaboración Propia

Partida	Concepto	€
Desmontaje de equipo de Calefacción y ACS para sustitución por equipo con mejor eficiencia energética	Desmontaje de equipo mixto de calefacción y producción de ACS formado por caldera convencional de gasóleo, doméstica, de pie, de 20kW de potencia calorífica máxima y soportes de fijación con medios manuales mecánicos y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.	162,93
Unidad aire-agua bomba de calor reversible, para instalación en interior.	Rehabilitación energética mediante la colocación, en sustitución de equipo existente, de bomba de calor aerotermica aire-agua reversible de la marca Ferroli modelo bibloc 12 Omnia ST3.2 con acumulador de 240L, R-32, potencia 11,9kW.	6.756,91
Incorporación de sistema solar fotovoltaico sobre cubierta inclinada	Rehabilitación energética mediante incorporación de sistema solar fotovoltaico, sobre cubierta inclinada, formado por 5 módulos solares fotovoltaicos Ja Solar de células de silicio monocristalino de potencia máxima (Wp) 450W, inversor monofásico Huawei Sun2000-2KTL-L1 estructura soporte y armario de conexiones.	2.458,83
TOTAL INVERSIÓN INICIAL OPCIÓN 3		9.378,68

Tabla 30: Resumen Inversión inicial de los distintos equipos. Fuente: elaboración propia.

	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Aerotermia	Opción 3: Aerotermia + Fotovoltaica
Inversión inicial (€)	5.548,97	6.919,84	9.378,68

En cuanto a los costes de mantenimiento y su frecuencia, en la Instrucción Técnica del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios IT 3.3 “Programa de mantenimiento preventivo” (Ministerio de la Presidencia BOE, 2007) aparece la tabla 3.1 en la que se detalla la frecuencia de los mantenimientos en viviendas para los distintos equipos, donde se indica que en bombas de calor con potencia nominal inferior a 12kW la frecuencia del mantenimiento será de 4 años. Tanto para la caldera de gasoil como la de pellets, al tratarse de instalaciones de potencia útil nominal inferior a 70kW, su frecuencia de mantenimiento será anual, con una revisión cada 2 años incluida en el propio mantenimiento. En lo relativo a los costes se ha estimado un coste medio de 150€ por mantenimiento para todos los equipos de climatización, y de 100€ para la instalación fotovoltaica con mantenimiento anual. En la práctica estos costes dependen de la empresa encargada de dicho mantenimiento. En la Tabla 31 se reflejan los costes anuales de energía y mantenimiento para los distintos sistemas.

Tabla 31: Costes anuales de energía y de mantenimientos para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Inst. Actual Caldera Gasóleo	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Bomba de Calor	Opción 3: Bomba de Calor + FV
Coste Anual Energía (€)	1.734,09	950,18	693,30	0,00
Coste Anual Mantenimiento (€)	150,00	150,00	37,50	137,50
Coste Anual Total (€)	1.884,09	1.100,18	730,80	137,50

Con estos datos se calcula el ahorro anual en el coste de la energía consumida, en mantenimiento y total para los distintos sistemas respecto a la instalación original, representado en la Tabla 32.

Tabla 32: Ahorros anuales de energía, de mantenimientos y totales para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

Ahorro	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Bomba de Calor	Opción 3: Bomba de Calor + FV
Energía Absoluto (€)	783,91	1.040,79	1734,09
Energía Relativo (%)	45,21	60,02	100,00
Mantenimiento Absoluto (€)	0,00	112,50	12,50
Mantenimiento Relativo (%)	0,00	75,00	8,33
Total Absoluto (€)	783,91	1.153,29	1.746,59
Total Relativo (%)	41,61	61,21	92,70

Este tipo de tecnologías tienen una vida útil de entre 15 y 20 años, llegando en algunos casos a los 25 años si las condiciones climáticas no son excesivamente extremas y se mantienen los equipos cuidadosamente. Por ello se ha considerado el cálculo de los indicadores clave del próximo apartado para 15 y

para 20 años. En la Tabla 33 se muestra el ahorro total acumulado considerando ambos periodos para las distintas tecnologías.

Tabla 33: Ahorro total en 15 y 20 años para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Bomba de Calor	Opción 3: Bomba de Calor + FV
Ahorro total en 15 años (€)	11.758,68	17.299,31	26.198,88
Ahorro total en 20 años (€)	15.678,24	23.065,75	34.931,84

5.4 Análisis económico: Indicadores clave para el análisis de la inversión

En la sociedad actual está claro que hay cada vez un más creciente interés en el ahorro energético, pero lo que prioriza el usuario es el ahorro económico de las decisiones que toma. Por ello cobra una vital relevancia el cálculo de diversos indicadores claves que permiten obtener una visión cuantitativa de la validez de la inversión realizada. Evidentemente, carecería de sentido para el individuo cambiar un sistema de climatización por otro si este no supone un ahorro monetario. Por tanto, los principales indicadores que se van a estudiar son el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) o *Payback* y el Retorno sobre la Inversión (ROI) o *Return of Investment*, y sus definiciones han sido extraídas de los libros “Fundamentos de finanzas corporativas” (Ross, 2022) y de “*Principles of corporate Finance*” (Brealey, 1984).

Para calcular estos valores, se tendrá en consideración la inversión inicial realizada para instalar los nuevos equipos y el ahorro económico que suponen en las facturas, así como en el coste de mantenimiento requerido. Al no tratarse de una inversión que da ingresos, se tratarán como ingresos el ahorro respecto a la tecnología actual. En la Tabla 34 se muestran los flujos de caja y el acumulado en un periodo de 20 años para todas las tecnologías.

Tabla 34: Flujos de caja y acumulados durante 20 años para las distintas tecnologías. Fuente: Elaboración propia.

Año	Opción 1: Caldera de Pellets		Opción 2: Bomba de Calor		Opción 3: Bomba de Calor + FV	
	CashFlow	Acumulado	CashFlow	Acumulado	CashFlow	Acumulado
0	-5.548,97	-5.548,97	-6.919,84	-6.919,84	-9.378,68	-9.378,68
1	783,91	-4.765,06	1.153,29	-5.766,56	1.746,59	-7.632,08
2	783,91	-3.981,15	1.153,29	-4.613,27	1.746,59	-5.885,49
3	783,91	-3.197,24	1.153,29	-3.459,98	1.746,59	-4.138,90
4	783,91	-2.413,33	1.153,29	-2.306,69	1.746,59	-2.392,31
5	783,91	-1.629,41	1.153,29	-1.153,41	1.746,59	-645,72
6	783,91	-845,50	1.153,29	-0,12	1.746,59	1.100,88
7	783,91	-61,59	1.153,29	1.153,17	1.746,59	2.847,47
8	783,91	722,32	1.153,29	2.306,46	1.746,59	4.594,06
9	783,91	1.506,23	1.153,29	3.459,74	1.746,59	6.340,65
10	783,91	2.290,15	1.153,29	4.613,03	1.746,59	8.087,25
11	783,91	3.074,06	1.153,29	5.766,32	1.746,59	9.833,84
12	783,91	3.857,97	1.153,29	6.919,61	1.746,59	11.580,43
13	783,91	4.641,88	1.153,29	8.072,89	1.746,59	13.327,02
14	783,91	5.425,79	1.153,29	9.226,18	1.746,59	15.073,61
15	783,91	6.209,70	1.153,29	10.379,47	1.746,59	16.820,21
16	783,91	6.993,62	1.153,29	11.532,76	1.746,59	18.566,80
17	783,91	7.777,53	1.153,29	12.686,04	1.746,59	20.313,39
18	783,91	8.561,44	1.153,29	13.839,33	1.746,59	22.059,98
19	783,91	9.345,35	1.153,29	14.992,62	1.746,59	23.806,57
20	783,91	10.129,26	1.153,29	16.145,91	1.746,59	25.553,17

5.3.1 Valor Actual Neto

A la hora de hacer una inversión valdrá la pena realizarla si crea valor para el que la lleva a cabo. Para ello se recurre al cálculo del Valor Actual Neto (VAN), que se realiza mediante la Ecuación 23. Si el valor del VAN es negativo se deber rechazar la inversión. Sin embargo, si el valor del VAN es positivo, el proyecto genera valor y por tanto es rentable. En este caso permite ahorro económico. El dinero no vale lo mismo ahora que en el futuro, debido a la inflación y al costo de oportunidad. Por lo tanto, representa la diferencia entre la inversión realizada en el presente y el valor actual de los flujos de caja que genera la inversión en el futuro

$$VAN = -I_0 + \sum_t^n \frac{F_t}{(1+k)^t}$$

Ecuación 23

Donde:

I_0 = Inversión inicial realizada en el momento inicial ($t=0$)

t = número del periodo (año)

n = número total de periodos

F_t = Flujo de caja del periodo t (ingresos menos gastos en ese periodo)

k = Tasa de descuento

Para elegir la tasa de descuento hay que considerar varios factores. Si la misma cantidad de dinero se invierte en algún tipo de producto financiero, ¿qué interés podría aportar? Si se decide solicitar un préstamo, tampoco tendría sentido que el interés del préstamo fuese mayor que la tasa de descuento, ya que se perdería dinero. El proyecto que se pretende realizar ¿qué riesgo conlleva? ¿hay mucha incertidumbre sobre los ahorros? Además, si se pretende mantener el poder adquisitivo de la inversión, habrá que tener en cuenta la inflación esperada. Por todo ello, se ha considerado que, al no ser una inversión inicial muy grande, se dispone de la cantidad necesaria para realizarlo, por lo que no habrá que recurrir a un préstamo. También se ha considerado que invirtiendo el dinero de otra manera se podría obtener un interés anual del 4%. A la vista de la experiencia en los últimos años en el cambio hacia fuentes renovables y los resultados energéticos, y pese a la variabilidad en el mercado de la luz, se ha considerado que este tipo de proyectos carecen de riesgo financiero. Y por último se ha tenido en cuenta una inflación del 3% anual, basada en los resultados más recientes. Por tanto, la tasa de interés se ha valorado como un total de 7%.

Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 35.

Tabla 35: Resultados del VAN a 15 y a 20 años para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Bomba de Calor	Opción 3: Bomba de Calor + FV
Inversión Inicial (€)	5.548,97	6.919,84	9.378,68
Ingresos Anuales (€)	783,91	1153,29	1746,59
Tasa de interés	7 %	7 %	7 %
VAN (€) a 15 años	1.590,83	3.584,20	6.529,13
VAN (€) a 20 años	2.755,80	5.298,10	9.124,75

5.3.2 Tasa Interna de Retorno

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Si la TIR es mayor que la tasa de descuento, la inversión será rentable. Esta indica el porcentaje de rentabilidad que se obtiene al realizar una inversión. Se calcula mediante la Ecuación 24.

$$VAN = -I_0 + \sum_t^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde los parámetros tienen el mismo significado que para el VAN.

Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 36.

Tabla 36: Resultados del TIR a 15 y a 20 años para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Bomba de Calor	Opción 3: Bomba de Calor + FV
Inversión Inicial (€)	5.548,97	6.919,84	9.378,68
Ingresos Anuales (€)	783,91	1153,29	1746,59
TIR (%) a 15 años	11,29	14,47	16,81
TIR (%) a 20 años	12,87	15,78	17,94

5.3.3 Periodo de Recuperación de la Inversión

El Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) que, generalmente se conoce como *Payback*, es la cantidad de tiempo que requiere una inversión para generar suficientes flujos de efectivo para recobrar el costo inicial, es decir, nos indica en cuánto tiempo se va a recuperar la inversión inicial realizada.

Observando los datos obtenidos de la Tabla 34, en el caso de rehabilitar con caldera de pellets se comienzan a obtener beneficios a partir del 8º año. Si se sustituye por la bomba de calor, el *Payback* se obtiene en el 7º año, y si además se realiza una hibridación con paneles fotovoltaicos, se obtiene un saldo positivo

a partir del 6º año. Se muestran estos datos en la Tabla 37 a modo de resumen, y también se encuentran resaltados en color azul en la Tabla 34.

Tabla 37: Resultados del Payback para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Aerothermia	Opción 3: Aerothermia + Fotovoltaica
Payback (año)	8º	7º	6º

5.3.4 Retorno sobre la Inversión

El Retorno sobre la Inversión (ROI, de *Return of Investment* en inglés) mide la rentabilidad de una inversión en relación con su coste, es decir, que indica cuánto se gana por cada euro invertido. En este caso sería cuanto ahorro se obtiene por cada euro invertido. Se calcula mediante la Ecuación 25.

$$ROI (\%) = \frac{\text{Ingresos} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} \cdot 100 = \frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Inversión}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 25}$$

Por tanto, en la Tabla 38 se muestran los resultados obtenidos para los casos de rehabilitación energética aplicados.

Tabla 38: Resultados del ROI a 15 y a 20 años para las distintas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Aerothermia	Opción 3: Aerothermia + Fotovoltaica
Inversión Inicial (€)	5.548,97	6.919,84	9.378,68
Beneficio Neto a 15 años (€)	6.209,70	10.379,47	16.820,21
ROI (%) a 15 años	111,91 %	150,00 %	179,35 %
Beneficio Neto a 20 años (€)	10.129,26	16.145,91	25.553,17
ROI (%) a 20 años	182,54 %	233,33 %	272,46 %

5.3.5 Resumen del estudio económico

A continuación, se representa en la Tabla 39 un resumen con los distintos indicadores clave para las distintas tecnologías. Es relevante destacar que estos valores podrían verse incrementados si se solicitan ayudas, subvenciones o incentivos fiscales y finalmente son concedidos.

La opción más barata en cuanto a inversión inicial es la caldera de pellet y, evidentemente la opción más cara es la bomba de calor al añadirle el sistema fotovoltaico. Los mantenimientos no suponen un alto coste respecto al ahorro anual, siendo la energía el factor más influyente. La caldera de biomasa apenas

consume energía eléctrica, por lo que el ahorro se distingue en el cambio de combustible donde el pellet es más barato que el gasoil a pesar de producir menos calor por unidad de masa. Al precio actual de la electricidad, la bomba de calor no tiene comparación con la biomasa, pero el mercado eléctrico puede tener épocas de gran precio de venta como se ha experimentado recientemente. Al añadirle los paneles fotovoltaicos se elimina la dependencia del precio de la electricidad y por tanto el ahorro energético es absoluto. Los ahorros totales a largo plazo son muy notables, tanto a 15 como a 20 años, para cualquier tecnología utilizada de las tres soluciones aportadas para la rehabilitación.

En cuanto a los indicadores financieros, el VAN, que indica el beneficio generado descontando los costes futuros incluyendo el aspecto de la inflación de la economía, da valores positivos en los tres casos, lo que indica que no solo no se pierde dinero, sino que se gana (en este estudio se trata de dinero ahorrado). El TIR es, para todos los casos, superior a la tasa de descuento aplicada, lo que da la seguridad de que cualquier inversión es rentable. Incluso cabría la posibilidad de aumentar la tasa de interés por el motivo que sea, ya que hay margen suficiente como para observar que el TIR es superior, llegando a duplicar el valor considerado en el caso de la bomba de calor o añadiéndole a mayores paneles fotovoltaicos. Los periodos de recuperación son similares, estando entorno a la mitad de la vida útil del sistema escogido en el peor de los casos, es decir 15 años. Respecto al último indicador utilizado, el ROI, es aceptable para tener una visión rápida y simple de la inversión que se va a realizar, pero realmente no es precisa a lo largo del tiempo, ya que a diferencia del TIR y del VAN no tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo y por tanto no ajusta los flujos de caja futuros a su valor actual.

Tabla 39: Tabla resumen de los indicadores clave económicos. Fuente: elaboración propia.

	Opción 1: Caldera de Pellets	Opción 2: Aeroterminia	Opción 3: Aeroterminia + Fotovoltaica
Gastos Anuales Totales (€)	1.100,18	730,80	137,50
Inversión Inicial (€)	5.548,97	6.919,84	9.378,68
Ingresos Anuales (€)	783,91	1.153,29	1.746,59
Ahorro total en 15 años (€)	11.758,68	17.299,31	26.198,88
Ahorro total en 20 años (€)	15.678,24	23.065,75	34.931,84
VAN (€) a 15 años	1.590,83	3.584,20	6.529,13
VAN (€) a 20 años	2.755,80	5.298,10	9.124,75
TIR (%) a 15 años	11,29	14,47	16,81
TIR (%) a 20 años	12,87	15,78	17,94
Payback (año)	8º	7º	6º
ROI (%) a 15 años	111,91	150,00	179,35
ROI (%) a 20 años	182,54	233,33	272,46

Hacia una vivienda sostenible:

Transformación energética en climatización para viviendas unifamiliares

Como se observa, cualquier medida adoptada va a producir un beneficio económico lo suficientemente seguro como dar el paso y tomar la decisión de ejecutar una rehabilitación energética de calefacción y ACS en la vivienda unifamiliar del usuario.

6. CONCLUSIONES

El presente documento ha servido para dos labores principales.

La primera labor es didáctica, aportando información teórica sobre la rehabilitación energética de climatización en viviendas unifamiliares. Se han dado nociones básicas sobre concienciación climática y eficiencia energética. Posteriormente, se ha realizado una descripción de los principales sistemas convencionales, con los que casi cualquier lector puede verse identificado, y de las tecnologías renovables más comunes, destacando sus características y beneficios principales y sus usos. También se ha comentado el concepto de *Passive House* que, pese a que no es objeto de estudio de este trabajo, guarda una relación directa con el ahorro energético en climatización, y conviene tenerlo presente si se desea actuar sobre rehabilitaciones de este tipo. Además, se ha informado sobre el marco normativo y políticas energéticas actuales, así como acerca del etiquetado energético para viviendas y productos, lo cual es muy útil para el usuario. Todo ello se ha realizado bajo un lenguaje técnico pero accesible para que cualquier persona pueda entenderlo sin requerir un alto nivel de conocimiento de campo.

Por otro lado, se ha realizado una segunda labor de análisis para demostrar las consecuencias energéticas y económicas de la sustitución de equipos convencionales por alternativas renovables mediante el estudio de un caso concreto. Evidentemente, el estudio de rehabilitación tiene ciertas limitaciones y supuestos que convierten el caso ficticio en un ejemplo ideal. En la práctica, a la hora de ejecutar un cambio de estas dimensiones requiere de un proyecto en el cual se evalúen las instalaciones y la vivienda de manera profunda, y cada vivienda presentará características tan diferentes que harán que la potencia a instalar, los rendimientos, los costes de instalación, las obras necesarias, los equipos instalados, tanto productores como emisores, y otras variables difieran de los resultados obtenidos. Además, los costes de los combustibles fósiles o de la luz, o incluso las normativas, como se ha observado en los últimos años, tienen una variabilidad e incertidumbre muy dependiente de la geopolítica del momento, por lo que los resultados obtenidos tanto en el estudio económico realizado como en los estudios de los proyectos profesionales pueden variar mucho al tener una consideración de largo plazo en el tiempo. Pese a ello, los resultados obtenidos son realistas.

A nivel cuantitativo, las emisiones de la caldera de pellets por su carácter biogénico son nulas, al igual que las referentes a la bomba de calor con paneles fotovoltaicos. Para el uso de la bomba de calor sin paneles las emisiones se reducen en un 80 % respecto al sistema actual si se logra que no haya fugas del refrigerante y este se gestiona correctamente al final de su vida útil, además de tener un 70,50 % de energía renovable, y que la energía producida no requiere de una combustión directa de combustible. A nivel económico, la opción más rentable es la bomba de calor con paneles fotovoltaicos ya que, pese a tener una mayor inversión inicial, se logra un ahorro anual superior a 1700 € respecto al sistema actual, tanto en mantenimientos como en coste de la energía.

Tanto en el análisis energético como en el económico queda claro que unas alternativas son mejores que otras, pero es importante darse cuenta de que todas son buenas y válidas, ya que mejoran en ambos aspectos al sistema actual, con valores realmente importantes. Actuar de esta forma tiene un doble beneficio principal, el cual ha quedado demostrado, que no debería hacer dudar a alguien cuyo sistema actual no sea renovable. A este doble beneficio hay que añadirle otras ventajas, como la funcionalidad si se desea incluir refrigeración con la bomba de calor, la seguridad de los sistemas o la revalorización de la vivienda. Si además se tienen en cuenta las posibles ayudas y subvenciones actuales, la decisión a tomar está más que clara.

Además, este documento abre la puerta a multitud de líneas futuras de investigación debido a la amplia cantidad de tecnologías disponibles y sus posibles usos. Entre ellas, se podría profundizar en el estudio de la integración de tecnologías híbridas que combinan energías renovables con sistemas convencionales, optimizando el uso de ambos, o realizar un estudio con consumos reales de una vivienda concreta y actuando tanto en los equipos productores y emisores como en las características físicas del edificio bajo el concepto de vivienda pasiva y evaluar los costes asociados.

Por todo lo mencionado, con el presente documento se ha conseguido aportar una idea general sobre la importancia de la rehabilitación energética de climatización en viviendas unifamiliares, haciendo un recorrido por las distintas tecnologías tanto convencionales como renovables e ilustrando un caso ficticio de estudio para dar visibilidad a la doble ventaja de las renovables de ayudar a ser más respetuoso con el medio ambiente a la par que se logra un ahorro económico.

Por último, este trabajo también ha subrayado la importancia de la concienciación y educación del consumidor ya que, aunque los costos iniciales puedan ser una barrera, el conocimiento y la disponibilidad de soluciones cada vez más accesibles, junto con las políticas de incentivos y subvenciones, están facilitando la transición hacia un modelo energético más sostenible. Es trascendental seguir fomentando la formación y difusión de información sobre las ventajas de la rehabilitación energética, ya que esto puede ser clave para acelerar la adopción de tecnologías más limpias y eficientes.

BIBLIOGRAFÍA

Para el desarrollo de este documento se han utilizado las siguientes fuentes bibliográficas:

Activa Energías Renovables. (2021, mayo 14). *¿Qué es el suelo Radiante y cómo funciona? Componentes y Beneficios*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.activaenergiasrenovables.com/que-es-el-suelo-radiante/>

AFEC. (s. f.). *Todo sobre la Bomba de Calor - Bomba de Calor*. Recuperado 12 de febrero de 2025, de <https://www.bombadecolor.org/>

Agencia Tributaria. (s. f.). *Agencia Tributaria: Deducciones por obras de mejora de la eficiencia energética de las viviendas*. Recuperado 13 de enero de 2025, de <https://sede.agenciatributaria.gob.es/Sede/vivienda-otros-inmuebles/deducciones-obras-mejora-eficiencia-energetica-viviendas.html?faqId=f29a2c21cb6bc710VgnVCM100000dc381e0aRCRD>

Arnabat, I. (2015, septiembre 18). *La etiqueta energética de conjunto en instalaciones de calefacción*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/la-etiqueta-energetica-conjunto-instalaciones-de-calefaccion.html>

Arnabat, I. (2016, diciembre 27). *Fundamentos de la refrigeración: el desescarche*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/fundamentos-de-la-refrigeracion-el-desescarche.html>

Arnabat, I. (2022, enero 18). *Suelo radiante: Ventajas e inconvenientes de la calefacción radiante*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/suelo-radiante/suelo-radiante-ventajas-e-inconvenientes.html>

Arnabat, I. (2023, marzo 14). *Calderas de biomasa - La calefacción más ecológica*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/calderas/calderas-de-biomasa-ventajas-y-funcionamiento.html#precios>

ASHRAE. (2021). *2021 ASHRAE Handbook : fundamentals* (R. and A.-C. E. American Society of Heating, Ed.; SI Edition) [Book]. ASHRAE.

ASHRAE. (2023). *2023 ASHRAE Handbook : HVAC Applications* (R. and A.-C. E. American Society of Heating, Ed.) [Book]. ASHRAE.

Atecyr. (s. f.). *Calcula con Atecyr: Programa Sicro*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <http://www.calculaconatecyr.com/psicro.php>

- AutoSolar. (s. f.). *¿Qué son los fancoils y cómo funcionan?* Recuperado 24 de febrero de 2025, de <https://autosolar.es/fancoils>
- BAXI. (s. f.). *Directiva ErP y etiquetado energético en calderas* | BAXI. Recuperado 10 de febrero de 2025, de <https://www.baxi.es/blog/normativa-erp-y-etiquetado-energetico-en-calefaccion>
- Blanco, R., Jakits, C., Pérez, L., Moreno, J., & Aguilar, A. (2024). *Proyecto final de transferencia de calor- Radiadores*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-tecnologica-de-panama/transferencia-de-calor-y-masa/proyecto-final-de-transferencia-de-calor-radiadores-funcion-clasificacion-historia/99575114>
- Brealey, R. A. (1984). *Principles of corporate finance* (S. C. Myers, Ed.; 2nd ed) [Book]. MacGraw-Hill Book Company.
- ClickGasoil. (2025, marzo). *Evolución del precio Gasoil Calefacción en Segovia*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.clickgasoil.com/p/evolucion-del-precio-gasoil-calefaccion-en-segovia>
- Comunidad de Madrid. (2023, noviembre 14). *Certificado de eficiencia energética en viviendas* | Comunidad de Madrid. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.comunidad.madrid/servicios/consumo/certificado-eficiencia-energetica-viviendas>
- Domínguez, M. (2022a, febrero 9). *Radiadores a baja temperatura: más eficiencia y mayor confort*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/radiadores/radiadores-baja-temperatura-mas-eficiencia-mayor-confort.html>
- Domínguez, M. (2022b, marzo 4). *Consejos para entender la etiqueta energética del aire acondicionado*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/entender-la-etiqueta-energetica-del-aire-acondicionado.html>
- Espiñeira, P. (2021, abril 26). *¿Qué es COP y EER? Coeficientes de rendimiento y Eficiencia Energética en refrigeración y bomba de calor*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/definiciones-cop-y-eer.html>
- Espiñeira, P. (2023, marzo 10). *Bomba de calor Inverter ¿Por qué es el sistema más eficiente?* Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/bomba-de-calor-inverter-sistema-eficiente-infografia.html>
- European Commission. (s. f.). *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. Recuperado 16 de marzo de 2025, de https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/

- Eurovent-Certification. (2023a, diciembre 5). *Selección natural: El auge de los refrigerantes de bajo GWP | Bomba de calor Eurovent Certita Certification*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.eurovent-certification.com/es/category/article/natural-selection-the-rise-of-low-gwp-refrigerants?universe=heat-pump#Normativa%20sobre%20gases%20fluorados,%20el%20Protocolo%20de%20Montreal%20y%20la%20reducci%C3%B3n%20progresiva%20de%20los%20HFC>
- Eurovent-Certification. (2023b, diciembre 14). *Gases fluorados refrigerantes | Bomba de calor Eurovent Certita Certification*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.eurovent-certification.com/es/category/article/f-gas-refrigerants?universe=heat-pump>
- Ferretería online VTC. (s. f.). *¿Cuál es la mejor ubicación para los radiadores?* Recuperado 24 de febrero de 2025, de <https://www.ferreteriaonlinevtc.com/blog/cual-es-la-mejor-ubicacion-para-los-radiadores-n384>
- Fundación Descubre - Junta de Andalucía. (s. f.). *Uso de la energía solar fotovoltaica para calefacción o calentar agua*. Recuperado 24 de febrero de 2025, de <https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/sobre-la-energia/preguntas-y-respuestas/energias-renovables/se-puede-utilizar-la-energia-solar-fotovoltaica-para-la-calefaccion-o-para-calentar-agua/>
- García Montes, J. P., Miguez Gómez, C., Monedero Gómez, F., & Rico Arroyo, I. (2014). *Parque de bombas de calor en España - Síntesis del estudio. Estudios IDAE, 01*.
- Generalitat de Catalunya. (2024). *Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico. Cambio climático*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/index.html
- Hevia-Haza García, R. (2024). *Presentación Ekogar - Jornada sobre Edificación Sostenible | Descarbonización de viviendas y edificios con bombas de calor*.
- Hitachi. (2022, agosto 23). *Bomba de calor y aire acondicionado: ¿Cuál es mejor?* Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.hitachiaircon.com/es/noticias/diferencias-entre-el-ac-y-las-bombas-de-calor-que-debes-saber>
- IDAE. (s. f.). *Energías Renovables: Energía Solar Térmica*.
- IDAE. (2006, octubre). *Energía Solar Térmica*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_solar_termica_06_8a90370e.pdf

- IDAE. (2007). *Energías Renovables - Biomasa Edificios Biomasa Edificios Energía de la Biomasa - Gobierno de España Ministerio de Industria, Turismo y Comercio*.
- IDAE. (2010). Guía técnica - Condiciones climáticas exteriores de proyecto Guía técnica Condiciones climáticas exteriores de proyecto. *Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización*, 12. Recuperado 20 de marzo de 2025, de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_12_Guia_tecnica_condiciones_climaticas_exteriores_de_proyecto_e4e5b769.pdf
- IDAE. (2022). *Guía Técnica de Energía Solar Térmica IDAE - ASIT. Guías IDAE 022*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.idae.eswww.asit-solar.com>
- IDAE, & AFEC. (2023). La bomba de calor en la rehabilitación energética de edificios. *Guías IDAE*, 025. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.afec.es>
- Instaltec. (s. f.). *Instalaciones y venta Radiador baja temperatura Jaga Tempo*. Recuperado 24 de febrero de 2025, de <https://tienda.instalaciones-tecnicas.com/InstalTec/madrid/jaga/radiadores/radiador-tempo-temw-060-xxx-15/radiador-baja-temperatura-jaga-tempo-p-296.html>
- Kosner. (2016, junio 1). *Etapas del ciclo de refrigeración*. Artículos Técnicos Kosner. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.kosner.es/ciclo-de-refrigeracion/>
- Lozano Serrano, M. Á. (2019). *Colectores Solares Térmicos*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.researchgate.net/publication/338254329>
- Mimesis, M. (2021, junio 20). *Passive House: Lo que no te cuentan de las casas pasivas - YouTube*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.youtube.com/watch?v=2h5NEONhDao>
- Ministerio de la Presidencia BOE. (2007, agosto 29). *Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*. «BOE» núm. 207, de 29 de agosto de 2007 Referencia: BOE-A-2007-15820. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. (2022a). *Código Técnico de Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía. Modificaciones conforme al Real Decreto 550/2022, de 14 de Junio (BOE15/06/2022)*.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. (2022b). *Código Técnico de Edificación. Documento Básico HS Salubridad*.
- Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. (s. f.-a). *Ayudas europeas para la rehabilitación de edificios residenciales y viviendas | Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana*. Recuperado 13 de enero de 2025, de

<https://www.mivau.gob.es/vivienda/ayudas-europeas-rehabilitacion-edificios-viviendas>

Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. (s. f.-b). *Programa de fomento de la mejora de la eficiencia energética y la sostenibilidad en viviendas* | Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. Recuperado 13 de enero de 2025, de <https://www.mivau.gob.es/arquitectura-vivienda-y-suelo/programas-de-ayudas-a-la-vivienda/programa-de-fomento-de-eficiencia-energetica-y-sostenibilidad-en-viviendas>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021, marzo). *Ya está en vigor el nuevo etiquetado energético de electrodomésticos*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.miteco.gob.es/en/ceneam/carpeta-informativa-del-ceneam/novedades/etiquetado-energetico-electrodomesticos.html>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España. (2024). *Factores de emisión*.

Natural Resources Defense Council. (s. f.). *Climate Change: Buildings*. Recuperado 2 de diciembre de 2024, de <https://www.nrdc.org/issues/buildings#overview>

Parlamento Europeo y del Consejo. (2018, diciembre 21). *DIRECTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*. Diario Oficial de la Unión Europea. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.boe.es/doue/2018/328/L00082-00209.pdf>

Passivhaus Institut. (s. f.). *Passive House requirements*. Recuperado 20 de febrero de 2025, de https://passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm

Peuser, F. A., Remmers, K.-H., & Schnauss, M. (2005). *Sistemas solares térmicos: diseño e instalación*. (K.-H. Remmers & M. Schnauss, Eds.; 1ª ed.) [Book]. Solarpraxis.

POWEN. (2023, julio 12). *Horas solares y Hora solar pico en España por provincia* | POWEN. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://powen.es/numero-horas-solares-en-espana/>

Red Eléctrica Española. (2025, marzo 10). *PVPC | ESIOS electricidad · datos · transparencia*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.esios.ree.es/es/pvpc?date=10-03-2025>

Rodríguez, M. (s. f.). *Definiciones y cálculo de EER, SEER, COP y SCOP*. Inesem Business School - Definiciones y cálculo de EER, SEER, COP y SCOP. Recuperado 20 de enero de 2025, de <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/rendimiento-energetico-climatizacion-eer-seer-cop-y-scop/>

- Ross, S. A. (2022). *Fundamentos de finanzas corporativas* (R. W. Westerfield, B. D. Jordan, & G. Enríquez Guadarrama, Eds.; 13ª ed) [Book]. McGraw-Hil.
- San Vicente, A. (2023, septiembre 21). *La Aerotermia con Fancoils ¿Cómo funciona y se instala este sistema?* Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/aerotermia/aerotermia-fancoils-como-funciona.html>
- Saunier Duval. (s. f.). *Eficiencia de la bomba de calor*. Recuperado 26 de febrero de 2025, de <https://studio.saunierduval.es/uploads/pdfs/6299dfcf10a52.pdf>
- Serrano, P. (2024, julio 30). *Certificado energético de vivienda: todo lo que debes saber*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de <https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/rehabilitacion-de-edificios/todo-lo-que-debemos-saber-sobre-certificado-energetico-edificios.html>
- TC Energía. (s. f.). *Diferencias entre el gas natural y el gas licuado del petróleo*. Recuperado 23 de enero de 2025, de <https://www.tcenergia.com/acerca-de-tc-energia/explorando-la-energia/diferencias-entre-el-gas-natural-y-el-gas-licuado-del-petroleo/>
- UNEP. (s. f.). *The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Recuperado 14 de enero de 2025, de <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/articles/article-2a-cfcs>
- UNEP. (2019, enero 3). *Entra en vigor la Enmienda Kigali, un poderoso aliado en la lucha contra el cambio climático*. Recuperado 20 de marzo de 2025, de https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/entra-en-vigor-la-enmienda-kigali-un-poderoso-aliado-en?_ga=2.64439215.1482859214.1736867303-1180887902.1736867303
- Wikipedia. (s. f.-a). *Archivo:Segovia - Trescasas.svg - Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado 3 de marzo de 2025, de https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Segovia_-_Trescasas.svg
- Wikipedia. (s. f.-b). *Provincia de Segovia - Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado 3 de marzo de 2025, de https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Segovia