



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER AUDITORÍA ENERGÉTICA DE UNA URBANIZACIÓN EN MADRID

Autor: Íñigo Rivero Alcorta

Director: Íñigo Sanz Fernández

Madrid

Agosto de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Auditoría energética de una urbanización en Madrid

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Iñigo Rivero

Fecha: 27 / 08 / 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

SANZ FERNANDEZ

IÑIGO -

52367115W

Fdo.: Iñigo Sanz

Firmado digitalmente por

SANZ FERNANDEZ IÑIGO -

52367115W

Fecha: 2025.08.31 10:22:03
+02'00'

Fecha: 28 / 08 / 2025



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER AUDITORÍA ENERGÉTICA DE UNA URBANIZACIÓN EN MADRID

Autor: Íñigo Rivero Alcorta

Director: Íñigo Sanz Fernández

Madrid

Agosto de 2025

Auditoría energética de una urbanización en Madrid

Autor: Iñigo Rivero

Tutor: Iñigo Sanz

Entidad colaboradora: Universidad Pontificia Comillas - ICAI

Resumen

Este proyecto desarrolla una auditoría energética integral en una urbanización residencial ubicada en Madrid, con el objetivo de evaluar los consumos actuales y proponer medidas de mejora que reduzcan el gasto económico, disminuyan las emisiones de CO₂ y aumenten la sostenibilidad del complejo.

Palabras clave: eficiencia energética, aerotermia, sostenibilidad

1. Introducción

La urbanización analizada presenta consumos energéticos significativos en calefacción centralizada, piscinas comunitarias, agua sanitaria y de riego y garajes. Estos elementos, comunes a muchas comunidades residenciales, suponen tanto un reto económico para los vecinos como una oportunidad de modernización hacia modelos más sostenibles.

2. Definición del proyecto

El proyecto consiste en diagnosticar la situación actual a partir de facturas reales de energía y agua, contrastadas con supuestos técnicos realistas, y en plantear alternativas tecnológicas como:

- Sustitución de calderas por aerotermia centralizada.
- Optimización de piscinas mediante cubiertas térmicas y bombas de velocidad variable.
- Medidas de eficiencia hídrica como reductores de caudal y reutilización de aguas grises.
- Modernización del garaje con puntos de recarga para vehículos eléctricos.

3. Descripción técnica

Cada medida se estudia con detalle desde la perspectiva técnica, económica y ambiental, calculando su CAPEX, OPEX, periodo de retorno simple, VAN y TIR. Además, se comparan alternativas, se cuantifica la reducción de emisiones y se analiza la alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

4. Resultados

Los resultados muestran que:

1. La aerotermia centralizada es la medida de mayor impacto, con una reducción estimada de más de 100 tCO₂/año.
2. Las cubiertas térmicas de piscina y los reductores de caudal presentan periodos de retorno muy cortos (2–3 años).
3. La reutilización de aguas grises aporta ahorros a medio plazo y mejora la resiliencia hídrica de la urbanización.
4. La instalación de puntos de recarga no genera ahorro directo, pero supone un fuerte impulso social y ambiental hacia la movilidad eléctrica.

5. Conclusiones

El estudio demuestra que la combinación de medidas de rápida amortización junto con inversiones estratégicas permite una reducción superior al 40 % de los costes anuales y más de 140 tCO₂/año en emisiones evitadas. Estas mejoras contribuyen tanto a la calidad de vida de los vecinos como a la revalorización del patrimonio inmobiliario, posicionando la urbanización como un referente en eficiencia energética y sostenibilidad.

Energy Audit of a Residential Complex in Madrid

Author: Iñigo Rivero

Supervisor: Iñigo Sanz

Collaborating Entity: Universidad Pontificia Comillas – ICAI

Abstract

This project develops a comprehensive energy audit of a residential complex in Madrid, with the aim of evaluating current consumption and proposing improvement measures to reduce costs, lower CO₂ emissions, and enhance the sustainability of the facilities.

Key words: energy efficiency, aerothermal heat pump, sustainability.

1. Introduction

The analyzed community presents significant energy use in centralized heating, swimming pools, domestic and irrigation water, and garages. These systems represent both an economic challenge for residents and an opportunity to modernize towards more sustainable models.

2. Project definition

The project is based on analyzing real energy and water bills, combined with technical assumptions, and proposing alternative technologies such as:

- Replacement of boilers with centralized aerothermal systems.
- Optimization of swimming pools through thermal covers and variable-speed pumps.
- Water efficiency measures like flow-reducing devices and greywater reuse systems.
- Upgrading garages with electric vehicle charging points.

3. Technical description

Each measure is assessed from a technical, economic, and environmental perspective, including calculations of CAPEX, OPEX, payback period, NPV, and IRR. Furthermore, alternatives are compared, emission reductions are quantified, and alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs) is evaluated.

4. Results

The results highlight that:

- Centralized aerothermal heating is the most impactful measure, reducing over 100 tCO₂/year.

- Thermal pool covers and flow reducers present very short payback periods (2–3 years).
- Greywater reuse provides medium-term savings and strengthens water resilience.
- Charging points do not generate direct savings but significantly promote the transition to sustainable mobility.

5. Conclusions

The study demonstrates that combining quick-payback measures with strategic long-term investments can achieve over 40% cost reduction and more than 140 tCO₂/year in avoided emissions. These improvements enhance both the residents' quality of life and the long-term value of the property, positioning the community as a benchmark in energy efficiency and sustainability.

Índice de contenido

1.	Introducción.....	17
2.	Motivación.....	22
2.1.	Motivación personal	22
2.2.	Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	23
3.	Situación actual del edificio y consumos.....	26
3.1.	Características generales del edificio	26
3.2.	Sistemas e instalaciones actuales.....	26
3.3.	Consumos energéticos y de agua	26
3.4.	Emisiones de referencia.....	27
4.	Sistema de calefacción centralizada y estrategias de mejora	28
4.1.	Descripción del sistema actual	28
4.1.1.	Contexto y función de la calefacción central en la urbanización	28
4.1.2.	Configuración y componentes principales	28
4.1.3.	Ventajas del sistema centralizado en su configuración actual	29
4.1.4.	Limitaciones y desventajas	29
4.1.5.	Estado de conservación y mantenimiento	30
4.1.6.	Rendimiento estacional estimado y KPIs actuales	30
4.2.	Aeroterminia centralizada	35
4.2.1.	Descripción y principios de funcionamiento	35
4.2.2.	Integración en edificios existentes	36
4.2.3.	Ventajas e inconvenientes técnicos y económicos.....	36
4.2.4.	Dimensionado y estimación de consumo.....	37
4.2.5.	Proyección de ahorros	37
4.3.	Sistema híbrido aeroterminia + gas.....	38
4.3.1.	Descripción e integración	38
4.3.2.	Ventajas e inconvenientes	39
4.3.3.	Proyección de ahorros	39
4.4.	Optimización del sistema de gas actual.....	40
4.4.1.	Descripción de la propuesta	40
4.4.2.	Ventajas e inconvenientes	41
4.4.3.	Proyección de ahorros	41
4.5.	Conclusiones comparativas de las alternativas de mejora.....	42

4.6.	Análisis económico aerotermia centralizada.....	44
4.6.1.	Alcance y método	44
4.6.2.	Inversión (CAPEX)	44
4.6.3.	OPEX	47
4.6.4.	Periodo de retorno simple.....	48
4.6.5.	Análisis de rentabilidad con Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).....	50
4.7.	Análisis de emisiones del sistema de calefacción.....	52
4.8.	Conclusiones parciales del capítulo de calefacción	53
5.	Optimización energética de la piscina comunitaria.....	54
5.1.	Sistema actual y supuestos de partida	54
5.1.1.	Geometría y volúmenes	54
5.1.2.	Uso y régimen operativo	54
5.1.3.	Circuito hidráulico y equipos existentes	54
5.2.	Propuestas de mejora energética en la piscina	56
5.2.1.	Instalación de cubiertas térmicas flotantes.....	56
5.2.2.	Sustitución de bombas de recirculación por equipos de velocidad variable	59
5.3.	Conclusiones parciales piscina comunitaria	64
6.	Optimización del consumo de agua en la urbanización	65
6.1.	Sistema actual y consumos.....	65
6.2.	Propuestas de mejora en la gestión del agua.....	66
6.2.1.	Instalación de reductores de caudal en grifería y duchas	66
6.2.2.	Reutilización de aguas grises para riego o cisternas	71
6.3.	Impacto ambiental y contribución a la sostenibilidad.....	76
6.4.	Conclusiones parciales consumo de agua	76
7.	Optimización energética y sostenibilidad en garajes comunitarios	78
7.1.	Contexto actual.....	78
7.2.	Implantación de puntos de recarga de vehículos eléctricos	79
7.2.1.	Marco normativo y requisitos técnicos	79
7.2.2.	Dimensionamiento inicial	79
7.2.3.	Costes de implantación.....	79
7.2.4.	Beneficios asociados.....	81
7.3.	Análisis económico	82

7.3.1.	Escenario base sin ayudas	82
7.3.2.	Escenario con ayudas MOVES III.....	83
7.3.3.	Periodo de retorno e interpretación	83
7.4.	Análisis de emisiones.....	83
7.4.1.	Supuestos de partida	83
7.4.2.	Emisiones anuales por vehículo	84
7.4.3.	Escenarios de vehículos eléctricos	84
7.4.4.	Interpretación de resultados	84
7.5.	Conclusiones parciales del bloque garaje.....	85
8.	Conclusiones.....	86
9.	Bibliografía.....	89

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Relevancia del sector edificatorio en el consumo energético. Fuente: Schneider (1).....	17
Ilustración 2: Urbanización desde vista superior. Fuente: Google Earth.....	18
Ilustración 3: Estructura de consumo. Fuente: Construable (2).....	19
Ilustración 4: Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: ONU (3)	23
Ilustración 5: Consumo (kWh térmicos) por mes	34
Ilustración 6: Esquema sistema de aerotermia centralizada. Fuente: Standard Hidráulica (9).....	36
Ilustración 7: Esquema híbrido gas + aerotermia. Fuente: Instalaciones Sánchez Braojos (12).....	39
Ilustración 8: Variadores de frecuencia. Fuente: Siemens (10)	41
Ilustración 9: Comparación consumo anual. Fuente: Elaboración propia.....	43
Ilustración 10: Comparación emisiones anuales. Fuente: Elaboración propia.....	43
Ilustración 11: Ficha técnica EAHV-M1800YCL-N. Fuente: RutamSoft (19).....	46
Ilustración 12: Comparativa periodos de retorno	50
Ilustración 13: Piscina comunitaria. Fuente: Google Earth	54
Ilustración 14: Esquema representativo piscina comunitaria. Fuente: Grupo Nice Pool (26).....	55
Ilustración 15: Esquema comparativo entre cubierta tradicional y cubierta reforzada. Fuente: Poolplus (27).....	56
Ilustración 16: Precio cubiertas térmicas. Fuente: Swimhome (30).....	58
Ilustración 17: Periodo de retorno cubierta térmica. Fuente: Elaboración propia	58
Ilustración 18: Bombas de velocidad variable Magnus-4 disponibles en el mercado. Fuente: OP (32).....	62
Ilustración 19: Periodo de retorno bombas VSD	63
Ilustración 20: Porcentaje de agua caliente en las duchas. Fuente: (34)	68
Ilustración 21: Precio de mercado reductor de caudal. Fuente: (35).....	69
Ilustración 22: Periodo de retorno reductor de caudal	70
Ilustración 23: Esquema de reutilización de aguas grises en edificios residenciales. Fuente: Ruberte (40)	72
Ilustración 24: Esquema de tratamiento biológico de aguas grises. Fuente: Metertech (42).....	73
Ilustración 25: Periodo de retorno sistema de reutilización de aguas grises	75
Ilustración 26: Ejemplo de punto de recarga inteligente en garaje comunitario. Fuente: Instantbox (46).....	78
Ilustración 27: Cargador Wallbox 7,4 kW. Fuente: Leroy Merlin (48).....	80

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Expresión para el cálculo del factor de conversión	31
Ecuación 2: Cálculo del factor de conversión	32
Ecuación 3: Consumo estimado por mes	32
Ecuación 4: Factor de conversión UC a kWh	33
Ecuación 5: Consumo específico	34
Ecuación 6: Fórmula factor de carga	34
Ecuación 7: Cálculo del factor de carga	35
Ecuación 8: Demanda eléctrica estimada.....	37
Ecuación 9: Coste sistema aerotermia centralizada	37
Ecuación 10: Fórmula CAPEX	45
Ecuación 11: CAPEX final aerotermia	47
Ecuación 12: Ahorro anual aerotermia.....	48
Ecuación 13: Payback aerotermia.....	48
Ecuación 14: Payback aerotermia con subvención.....	48
Ecuación 15: Inversión por vivienda	49
Ecuación 16: Deducción por vivienda.....	49
Ecuación 17: Payback con deducción sobre IRPF	49
Ecuación 18: Fórmula VAN	50
Ecuación 19: Fórmula TIR	51
Ecuación 20: Pérdida térmica por evaporación	57
Ecuación 21: Ahorro con cubierta	57
Ecuación 22: Periodo de retorno cubierta térmica	58
Ecuación 23: Consumo energético piscina	59
Ecuación 24: Coste eléctrico piscina.....	60
Ecuación 25: Ley del cubo de afinidad	60
Ecuación 26: Potencia media piscina grande	60
Ecuación 27: Potencia media piscina pequeña	60
Ecuación 28: Consumo energético piscina con bombas VSD	60
Ecuación 29: Coste eléctrico piscina con bombas VSD.....	61
Ecuación 30: Ahorro piscina con bombas VSD	61
Ecuación 31: CAPEX bombas VSD	63
Ecuación 32: Payback bombas VSD	63
Ecuación 33: Volumen anual total	65
Ecuación 34: Ahorro volumétrico agua caliente.....	68
Ecuación 35: Ahorro volumétrico agua fría	68
Ecuación 36: Ahorro económico anual reductores caudal.....	68
Ecuación 37: Periodo de retorno reductor de caudal.....	69
Ecuación 38: CAPEX sistema de reutilización de aguas grises.....	75
Ecuación 39: Periodo de retorno sistema de reutilización de aguas grises	75

Índice de tablas

Tabla 1: Consumo real y estimado por mes.....	32
Tabla 2: Consumo mensual en UC y kWh térmicos	33
Tabla 3: Comparativa de resultados económicos y energéticos.....	42
Tabla 4: Comparativa VAN y TIR distintos escenarios.....	51
Tabla 5: Selección de equipos bombas VSD	61
Tabla 6: Comparativa diferentes reductores	71
Tabla 7: Coste estimado por escenario.....	80
Tabla 8: Resumen económico de las medidas propuestas	87
Tabla 9: Resumen ambiental de las medidas propuestas.....	88

1. Introducción

La energía y el agua son recursos estratégicos cuya gestión eficiente se ha convertido en uno de los grandes retos de la sociedad actual. El cambio climático, la volatilidad de los precios de la energía y la creciente concienciación ambiental hacen necesario replantear la manera en la que utilizamos los recursos en nuestros edificios. En este contexto, las auditorías energéticas se configuran como una herramienta fundamental para conocer con detalle los consumos de un inmueble, identificar oportunidades de mejora y planificar inversiones que permitan reducir costes y emisiones contaminantes.

Según la Directiva 2012/27/UE y su transposición en España mediante el Real Decreto 56/2016, una auditoría energética es un procedimiento sistemático que permite:

- Obtener un conocimiento detallado del perfil de consumo energético de un edificio.
- Detectar las ineficiencias existentes en sus instalaciones.
- Cuantificar oportunidades de ahorro económico y energético.
- Proporcionar un marco de decisión para inversiones en eficiencia y sostenibilidad.

El sector de la edificación tiene un papel especialmente relevante: en España, los edificios representan alrededor del 30 % del consumo energético final y más del 35 % de las emisiones de CO₂ asociadas. Dentro de este parque, las comunidades residenciales multifamiliares constituyen un ámbito de gran interés, ya que concentran instalaciones comunes de gran consumo —calefacción, agua caliente sanitaria (ACS), piscinas y garajes— que ofrecen un elevado potencial de optimización.



Ilustración 1: Relevancia del sector edificatorio en el consumo energético. Fuente: Schneider (1)

La Ilustración 1 muestra de forma clara la magnitud del reto energético y ambiental asociado al sector de la edificación. A nivel europeo, los edificios son responsables de aproximadamente un 40 % del consumo energético total y de alrededor del 36 % de las

emisiones de CO₂. Estos valores confirman que la eficiencia energética en el ámbito residencial y terciario no es un aspecto secundario, sino un elemento central de las políticas de transición energética y descarbonización que se impulsan tanto desde la Unión Europea como desde los estados miembros.

El caso español resulta aún más significativo: apenas el 1 % de los edificios cuenta con una calificación energética A o B, mientras que entre el 85 y el 95 % del parque edificado actual seguirá en uso en 2050. Esto implica que la mayor parte de los inmuebles no fueron diseñados con criterios de eficiencia, y que las oportunidades de mejora pasan necesariamente por la rehabilitación energética y la implantación de tecnologías más sostenibles. La imagen, por tanto, pone de manifiesto que la modernización de las instalaciones existentes no solo es deseable, sino imprescindible si se pretende alcanzar los objetivos del Pacto Verde Europeo y del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC).

Este proyecto trata de realizar una auditoría energética integral en una urbanización de Madrid, con el objetivo de identificar las áreas de mejora y plantear soluciones innovadoras que combinen la eficiencia económica y energética. Este tipo de análisis resulta especialmente relevante en urbanizaciones con infraestructuras compartidas, como es el caso.

La urbanización está ubicada en Pinar de Chamartín y cuenta con dos bloques de edificios como se puede observar en la Ilustración 2. Está compuesta por 96 viviendas y con una serie de instalaciones comunes que representan una parte significativa del consumo total:

- Sistema centralizado de calefacción y ACS.
- Dos piscinas comunitarias (una de adultos y otra infantil).
- Garajes comunitarios, con un total de 127 plazas.
- Consumos de agua asociados al riego, grifería y usos sanitarios.

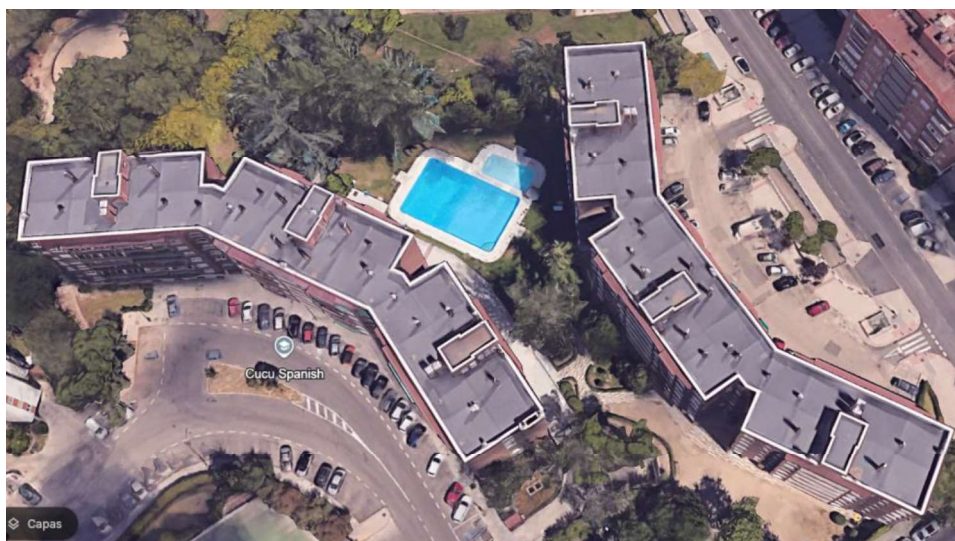


Ilustración 2: Urbanización desde vista superior. Fuente: Google Earth

Este complejo residencial resulta especialmente representativo del parque edificatorio español de finales del siglo XX: edificios con más de dos décadas de antigüedad, instalaciones que no han sido renovadas de forma integral y un consumo energético y de agua elevado en relación con los estándares actuales de eficiencia.

El propósito de esta auditoría no es únicamente evaluar el estado actual de las instalaciones, sino también proponer medidas de mejora que sean técnica y económicamente viables. En concreto, el estudio se estructura en torno a tres ejes principales:

- Eficiencia energética en calefacción y ACS, mediante la sustitución de sistemas obsoletos por soluciones de alta eficiencia como la aerotermia centralizada.
- Optimización en instalaciones comunes, incluyendo medidas en la piscina comunitaria (cubiertas térmicas, bombas de velocidad variable) y en los garajes (modernización de iluminación e incorporación de puntos de carga para vehículos eléctricos).
- Gestión eficiente del agua, a través de soluciones de bajo coste (reductores de caudal) y medidas avanzadas como la reutilización de aguas grises.

Estructura de Consumo según Uso Energético

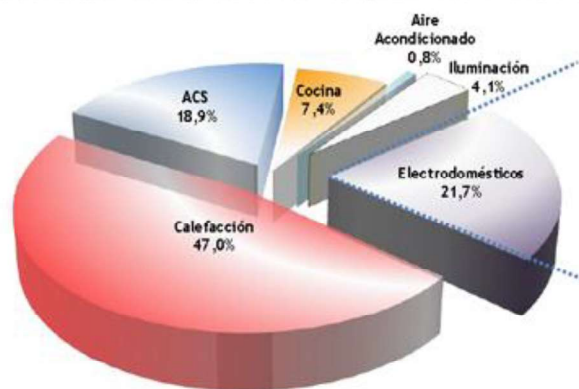


Ilustración 3: Estructura de consumo. Fuente: Construable (2)

La Ilustración 3 muestra la distribución típica del consumo energético en los edificios residenciales. Como se observa, la calefacción supone cerca de la mitad del consumo total (47,0 %), seguida por el agua caliente sanitaria (18,9 %) y los electrodomésticos (21,7 %). En conjunto, estos tres usos representan más del 85 % del consumo energético en una vivienda tipo, lo que pone de manifiesto que cualquier estrategia de ahorro y eficiencia debe enfocarse prioritariamente en estos ámbitos.

En menor proporción aparecen la cocina (7,4 %), la iluminación (4,1 %) y el aire acondicionado (0,8 %). Aunque su peso relativo es menor, no deben ser ignorados, ya que también ofrecen oportunidades de optimización y contribuyen al objetivo global de reducción del consumo. Esta visión global del reparto energético permite establecer de manera clara los objetivos del presente trabajo, centrados en la implantación de medidas de eficiencia en los sistemas de calefacción y ACS, en la optimización del

consumo de agua y en la incorporación de soluciones sostenibles en el garaje comunitario.

La realización de esta auditoría energética y de optimización de recursos en la comunidad residencial de Pinar de Chamartín se justifica por varios factores de índole técnica, económica y medioambiental. En primer lugar, el edificio objeto de estudio corresponde a una tipología constructiva previa a las normativas actuales de eficiencia energética, lo que implica sistemas de climatización, producción de agua caliente sanitaria, iluminación y gestión del agua con rendimientos muy inferiores a los que permiten las tecnologías actuales. Esta situación conlleva un consumo energético y de recursos hídricos significativamente elevado, con un impacto directo en los costes de explotación de la comunidad y, de manera indirecta, en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Desde el punto de vista normativo, se establece la obligación de avanzar hacia un parque edificado más eficiente y descarbonizado. La rehabilitación energética de edificios residenciales, especialmente aquellos con más de 30 años de antigüedad, constituye uno de los ejes centrales de las políticas públicas para alcanzar los objetivos climáticos de la Unión Europea. En este sentido, una auditoría energética en una comunidad de estas características no solo responde a una necesidad técnica, sino también a un alineamiento con las estrategias nacionales y europeas de sostenibilidad.

Adicionalmente, la progresiva electrificación de la demanda energética y la disponibilidad de tecnologías maduras como la aerotermia, la energía solar térmica o los sistemas de gestión eficiente del agua, convierten a esta comunidad en un caso representativo para demostrar la viabilidad técnica y económica de este tipo de intervenciones en entornos urbanos consolidados.

Más allá de la justificación técnica, este estudio adquiere relevancia desde una dimensión social y estratégica. En primer lugar, la comunidad residencial está formada por un número elevado de viviendas, lo que implica que cualquier mejora en términos de eficiencia energética o hídrica repercutirá en un colectivo amplio de personas. Esto significa no solo una reducción en los costes energéticos y de agua para los vecinos, sino también una mejora del confort térmico, de la calidad ambiental interior y del bienestar general. La incorporación de tecnologías más eficientes y sostenibles tiene además un efecto directo sobre el valor patrimonial de las viviendas.

La metodología aplicada sigue un enfoque integral:

1. Diagnóstico de la situación actual, mediante la recopilación de facturas energéticas y de agua, visitas técnicas y revisión de equipos instalados.
2. Identificación de medidas de mejora, adaptadas a las particularidades de la comunidad.
3. Evaluación técnico-económica de cada medida mediante indicadores como:
 - Periodo de retorno simple (Payback).

- Valor Actual Neto (VAN).
 - Tasa Interna de Retorno (TIR).
4. Análisis ambiental, centrado en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero derivada de la implantación de las medidas.

2. Motivación

2.1. Motivación personal

El desarrollo de este proyecto surge de una necesidad tanto personal como colectiva: la de mejorar la calidad de vida en la urbanización en la que resido, un espacio que comparto con numerosos vecinos y que constituye no solo nuestro hogar, sino también una inversión económica a largo plazo. Haber vivido en primera persona las dinámicas de la comunidad me ha permitido observar de manera directa las limitaciones y retos que afrontamos en materia de eficiencia energética, sostenibilidad y gestión de los recursos comunes.

Uno de los principales problemas detectados está relacionado con los elevados costes de los servicios comunitarios, especialmente aquellos vinculados al consumo energético: la calefacción centralizada, el funcionamiento y mantenimiento de la piscina o el alumbrado en zonas comunes. Estos gastos tienen un impacto directo en las cuotas mensuales de los vecinos, lo que repercute en la economía doméstica de cada familia y reduce la capacidad de la comunidad para acometer nuevas inversiones que podrían mejorar el confort y la calidad de vida de los residentes.

Más allá del aspecto económico, existe también una motivación ligada a la sostenibilidad ambiental. En un contexto en el que la lucha contra el cambio climático es un desafío global, resulta fundamental que también las comunidades de propietarios adopten medidas concretas para reducir su huella de carbono. La urbanización dispone de un gran potencial para aplicar soluciones tecnológicas innovadoras que disminuyan de manera significativa los consumos energéticos y hídricos, fomentando al mismo tiempo un modelo de vida más responsable y respetuoso con el entorno.

Otro factor clave que inspira este proyecto es la dimensión patrimonial. En el actual mercado inmobiliario, cada vez más competitivo, los compradores valoran muy positivamente aquellas viviendas que se sitúan en comunidades comprometidas con la eficiencia energética y la sostenibilidad. Mejorar las infraestructuras y optimizar el uso de los recursos no solo aporta beneficios inmediatos a los residentes actuales, sino que también se traduce en una revalorización de las propiedades, lo cual constituye un incentivo adicional de carácter estratégico.

En definitiva, esta motivación personal se apoya en tres ejes fundamentales: el deseo de reducir los gastos comunitarios, el compromiso con la sostenibilidad ambiental y la voluntad de revalorizar el patrimonio común. Este proyecto no pretende limitarse a una propuesta técnica, sino que busca ser una herramienta transformadora, un ejemplo de cómo una comunidad residencial puede adaptarse a los retos energéticos y medioambientales del presente y del futuro, consolidándose como un modelo de gestión eficiente, sostenible y orientado al bienestar colectivo.

2.2. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un conjunto de 17 objetivos adoptados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015 dentro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible que se pueden apreciar en la Ilustración 4.



Ilustración 4: Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: ONU (3)

En este caso, el trabajo que se va a realizar está alineado con los siguientes objetivos.

ODS 7 – Energía asequible y no contaminante

El ODS 7 busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Este proyecto contribuye de manera directa a este objetivo mediante:

- La sustitución del sistema de calefacción por uno basado en aerotermia centralizada, lo que reduce el consumo de combustibles fósiles y apuesta por una tecnología de alta eficiencia.
- La implementación de cubiertas térmicas y bombas de alta eficiencia en la piscina, disminuyendo el gasto energético.
- La propuesta de puntos de recarga para vehículos eléctricos en el garaje, fomentando la electrificación del transporte.

Con ello, la urbanización da un paso firme hacia un modelo energético más limpio y moderno, reduciendo costes y emisiones.

ODS 9 – Industria, innovación e infraestructura

La modernización de las instalaciones comunitarias constituye un ejemplo claro de innovación aplicada a las infraestructuras residenciales. La instalación de sistemas de climatización avanzados, equipos de bombeo de velocidad variable, o tecnologías para el reaprovechamiento de aguas grises, representan soluciones técnicas de vanguardia que transforman una infraestructura obsoleta en una infraestructura resiliente y

eficiente.

Además, se apuesta por la digitalización y la monitorización de consumos, lo cual abre la puerta a un futuro en el que la comunidad pueda gestionar sus recursos de manera más inteligente.

ODS 11 – Ciudades y comunidades sostenibles

Uno de los grandes retos de este siglo es conseguir que los entornos urbanos sean más sostenibles. Este proyecto impacta de lleno en este objetivo, ya que promueve:

- Un uso más eficiente de los recursos energéticos y hídricos.
- La reducción de los costes comunitarios, favoreciendo la asequibilidad de la vivienda.
- La mejora de la calidad de vida de los vecinos, con instalaciones más confortables, seguras y modernas.

La urbanización se convierte así en un modelo de comunidad sostenible, adaptable a los nuevos desafíos urbanos.

ODS 12 – Producción y consumo responsables

El uso racional de los recursos es un eje central del ODS 12. El proyecto lo aborda de varias formas:

- Con la instalación de reductores de caudal en grifos y duchas, que reducen de manera significativa el consumo de agua sin afectar al confort de los usuarios.
- Con la reutilización de aguas grises para riego y cisternas, maximizando el aprovechamiento de un recurso cada vez más escaso.
- Con la eficiencia energética en los garajes y optimización de la calefacción.

En conjunto, estas medidas fomentan un consumo más responsable y sostenible, con un claro beneficio económico y medioambiental.

ODS 13 – Acción por el clima

El proyecto contribuye de manera evidente al ODS 13, ya que todas las medidas implementadas conllevan una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

- El cambio de sistemas de calefacción a tecnologías basadas en aerotermia evita emisiones de CO₂ ligadas al gasóleo.
- Las mejoras en eficiencia energética y el fomento del vehículo eléctrico disminuyen la dependencia de combustibles fósiles.
- La reducción de consumos de agua implica una menor energía asociada a la potabilización, bombeo y depuración.

Todo ello hace que la comunidad avance hacia un modelo residencial bajo en carbono, alineado con los compromisos europeos de neutralidad climática.

En definitiva, este trabajo no debe entenderse únicamente como un plan de mejoras técnicas y económicas, sino como una estrategia integral de sostenibilidad que sitúa a la urbanización en sintonía con los objetivos globales de la Agenda 2030. La contribución directa a los ODS 7, 9, 11, 12 y 13 demuestra que las comunidades residenciales pueden ser actores clave en la transición hacia un futuro más eficiente, sostenible y respetuoso con el medioambiente.

3. Situación actual del edificio y consumos

3.1. Características generales del edificio

La urbanización objeto de estudio se encuentra en la Comunidad de Madrid y está compuesta por 96 viviendas distribuidas en varios bloques residenciales. Además de las zonas habitadas, la comunidad cuenta con dos garajes: uno de dos plantas con 40 y 42 plazas respectivamente, y un segundo garaje con una planta y 45 plazas, sumando un total de 127 plazas de aparcamiento.

Entre las zonas comunes destacan:

- Dos piscinas, una de adultos (20 × 10 m) y otra infantil (10 × 4 m).
- Jardines y espacios exteriores, con un consumo relevante de agua en temporada de riego.
- Portales y accesos, dotados de iluminación convencional.

En términos generales, se trata de un conjunto residencial de construcción no reciente, con instalaciones que muestran signos de antigüedad y que suponen un coste elevado de operación y mantenimiento, especialmente en los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS).

3.2. Sistemas e instalaciones actuales

Actualmente, la urbanización dispone de los siguientes sistemas:

- Calefacción centralizada y ACS: el sistema está basado en calderas de gasóleo con distribución por columnas a las viviendas. Esta instalación es la responsable del mayor consumo energético de la comunidad.
- Piscinas comunitarias: funcionan únicamente con sistemas de depuración estándar, sin climatización ni elementos de control de evaporación, lo que genera pérdidas de agua significativas en verano.
- Garajes: No existen puntos de recarga para vehículos eléctricos.
- Zonas comunes exteriores: el alumbrado es igualmente antiguo y con escasa eficiencia.

3.3. Consumos energéticos y de agua

El análisis de consumos se ha realizado a partir de las facturas facilitadas por la comunidad de propietarios correspondientes a los meses de enero y febrero de 2025.

- Agua:

En el mes de enero de 2025, la comunidad registró un consumo de 2.133,1 m³, con un coste total de 3.112,64 € (IVA incluido). Este valor integra tanto el agua destinada a uso doméstico como la vinculada a la producción de agua caliente sanitaria (ACS).

- **Calefacción:**

Para el suministro de calefacción centralizada, las facturas correspondientes a los primeros meses de 2025 reflejan:

Enero 2025: 95,61 €.

Febrero 2025: 64,98 €.

Estos importes recogen el gasto energético asociado al consumo de gasóleo durante la temporada de calefacción.

Con los datos disponibles, puede afirmarse que tanto el agua como la calefacción representan partidas relevantes en los costes de explotación de la comunidad. Los valores aquí mostrados constituyen la base de referencia a partir de la cual se desarrollarán los análisis técnicos y económicos de los apartados posteriores.

3.4. Emisiones de referencia

Las facturas analizadas no incluyen información específica sobre emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, debe señalarse que el uso de gasóleo en calefacción conlleva emisiones directas de CO₂, mientras que el consumo de agua y electricidad comunitaria implican emisiones indirectas asociadas a su producción y distribución.

En este capítulo se recogen únicamente los datos de consumo y coste facturados, quedando los cálculos detallados de emisiones y su reducción asociados a las medidas de mejora para los apartados posteriores.

4. Sistema de calefacción centralizada y estrategias de mejora

4.1. Descripción del sistema actual

4.1.1. Contexto y función de la calefacción central en la urbanización

La urbanización objeto de estudio, dispone de un sistema de calefacción centralizada concebido para proporcionar confort térmico uniforme a todas las viviendas y espacios comunes durante la temporada de calefacción. Este sistema se activa entre los meses de octubre y abril, siguiendo las condiciones meteorológicas de la ciudad, caracterizada por inviernos fríos y veranos muy cálidos.

La calefacción centralizada presenta una ventaja en este tipo de entornos: permite un control unificado de la generación térmica, con una única sala de calderas que atiende a todo el conjunto, reduciendo la necesidad de equipos individuales en cada vivienda y simplificando el mantenimiento. En este caso, el sistema también sirve como plataforma para la medición individualizada del consumo mediante repartidores de costes, con el fin de fomentar el uso racional de la energía.

4.1.2. Configuración y componentes principales

La urbanización dispone de un sistema de calefacción centralizada por agua caliente que da servicio a todas las viviendas y zonas comunes calefactadas, diseñado conforme al RITE y optimizado para el clima de Madrid. La instalación se articula en los siguientes subsistemas:

Generación térmica

Tipo de calderas: Dos calderas de gas natural de baja temperatura, con encendido modulante y quemadores atmosféricos.

Potencia térmica instalada: 700 kW térmicos, suficientes para cubrir la demanda pico invernal de la urbanización.

Rendimiento nominal: 90% sobre PCI a plena carga.

Disposición: Instaladas en sala de calderas centralizada ubicada en planta baja técnica, con acceso restringido a personal de mantenimiento.

Distribución hidráulica

Esquema hidráulico: Sistema bitubular de distribución en columna montante, con retorno inferior, que garantiza el suministro simultáneo a todas las viviendas.

Circuito primario: Une la sala de calderas con los colectores principales, con tuberías de acero al carbono DN80 y aislamiento de lana mineral de 30 mm.

Circuito secundario: Distribuye a través de montantes verticales a cada portal y vivienda, con tuberías de cobre de diámetros entre DN15 y DN25.

Bombas de circulación: Dos bombas centrífugas en paralelo de caudal constante (una en servicio y otra de reserva), sin variador de frecuencia, con potencia unitaria de 3 kW.

Emisores térmicos

Radiadores de aluminio en todas las estancias, con alturas de 600 mm y secciones de 80 mm, equipados con repartidores de costes y válvulas manuales de corte.

No se dispone de válvulas termostáticas en la mayoría de los emisores.

Elementos de control

Sonda exterior: Ubicada en fachada norte, utilizada para regular la temperatura de impulsión en función de la temperatura exterior mediante curva de compensación climática.

Central de regulación: Controla el encendido y apagado diario, así como la modulación de temperatura de impulsión en base a la señal de la sonda exterior y un horario preprogramado.

Sistema de medición: Cada radiador dispone de un repartidor de costes electrónico que mide la energía emitida en Unidades de Consumo (UC), multiplicadas por un factor K específico para cada emisor.

Producción de ACS

Integrada en la misma sala de calderas, con un depósito de acumulación de 1.500 litros y serpentín interno para intercambio de calor.

Producción instantánea asistida por las calderas, priorizando el ACS sobre la calefacción cuando hay demanda simultánea.

4.1.3. Ventajas del sistema centralizado en su configuración actual

- Mantenimiento simplificado: Un único punto de generación facilita revisiones y reparaciones.
- Mayor eficiencia en sistemas grandes: Las calderas de gran tamaño suelen tener rendimientos más estables a cargas altas que las unidades individuales, lo que supone un menor consumo de energía. (4)
- Comodidad y seguridad: La caldera se instala fuera del ámbito privado, lo cual libera espacio en las viviendas y mejora la seguridad en la comunidad. (5)
- Confort térmico uniforme: Estos sistemas tienden a proporcionar una temperatura homogénea en todo el edificio. (6)

4.1.4. Limitaciones y desventajas

- Falta de adaptación a demanda real: Las bombas de caudal constante no ajustan su rendimiento a la demanda real, provocando sobrecirculaciones y consumo energético innecesario. (7)

- Control poco granular: Aunque exista compensación climática, no se adapta a ocupación real por vivienda ni a ganancias internas.
- Pérdidas en distribución: Especialmente si el aislamiento es deficiente o el trazado recorre zonas no calefactadas.
- Inercia térmica elevada: Dificulta la respuesta rápida ante cambios de temperatura exterior o demanda.
- Equipos potencialmente obsoletos: Calderas de más de 15 años pueden tener rendimientos muy inferiores a la tecnología actual.

4.1.5. Estado de conservación y mantenimiento

De acuerdo con la normativa RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios), las instalaciones térmicas deben ser revisadas periódicamente. Sin embargo, la antigüedad de algunos componentes, unida a la ausencia de variadores de frecuencia y a la posible falta de optimización de la curva de compensación, sugiere que existe margen significativo de mejora.

La presencia de repartidores de costes y la facturación individualizada indican que la urbanización cumple con la parte de medición y reparto, pero no necesariamente con criterios de eficiencia óptimos en la generación y distribución.

4.1.6. Rendimiento estacional estimado y KPIs actuales

El presente estudio se centra en el intervalo octubre–abril, correspondiente a la temporada reglamentaria y climáticamente significativa de calefacción en la ciudad de Madrid. Según datos históricos de grados-día base 15 °C publicados por la AEMET, fuera de este periodo la demanda térmica es residual, con valores cercanos a cero. Este criterio se ajusta a las recomendaciones metodológicas del IDAE y a la práctica habitual en instalaciones centralizadas, donde el servicio de calefacción se limita a estos meses salvo autorizaciones especiales.

Para la estimación del rendimiento estacional y de los indicadores clave de desempeño (KPIs) del sistema de calefacción central, se parte de la información real disponible correspondiente a los meses de enero y febrero de 2025, procedente de las facturas de consumo de una vivienda tipo dentro de la urbanización objeto de estudio.

Los datos se expresan en Unidades de Consumo (UC), medida proporcionada por los repartidores instalados en cada radiador. A efectos de cálculo, se asume que las UC son proporcionales a la energía térmica entregada, pudiendo convertirse a kWh térmicos mediante un factor de conversión que depende del salto térmico (ΔT) y del caudal circulante.

Para la extrapolación al resto de la temporada de calefacción, se toma como referencia el perfil climático medio de la ciudad de Madrid, definido a partir de grados-día de calefacción (HDD) con temperatura base de 15 °C. Estos valores se han obtenido a

partir de series climáticas históricas y representan la severidad térmica relativa de cada mes de la temporada (octubre–abril).

En resumen, las entradas del cálculo son (facturas facilitadas por la vivienda a estudiar):

- **Consumo real medido (vivienda tipo):**
 - Enero 2025: **568 UC**.
 - Febrero 2025: **360 UC**.
- **Grados-día de calefacción (HDD15°C, valores medios para Madrid):**
 - Octubre: 150
 - Noviembre: 300
 - Diciembre: 450
 - Enero: 500
 - Febrero: 400
 - Marzo: 250
 - Abril: 100

Estos datos servirán de base para la calibración de un factor de conversión UC/HDD, que permitirá estimar el consumo de los meses sin medición directa, manteniendo coherencia con la climatología local y con el comportamiento real registrado en los meses de referencia.

El primer paso para estimar el consumo anual a partir de datos parciales consiste en establecer un factor de conversión entre las Unidades de Consumo (UC) registradas y la severidad climática mensual medida mediante grados-día de calefacción (HDD).

Dado que únicamente se dispone de datos reales de consumo para enero y febrero de 2025, se adopta como hipótesis que el consumo mensual es proporcional a los grados-día de dicho mes, manteniendo el resto de las condiciones constantes.

Para determinar el factor de conversión se emplea la siguiente expresión:

$$f = \frac{\sum_{m \in M} UC_m}{\sum_{m \in M} HDD_m}$$

Ecuación 1: Expresión para el cálculo del factor de conversión

donde:

UC_m = consumo real medido en el mes m [UC]

HDD_m = grados-día base 15 °C en el mes m [°C·día]

M = conjunto de meses con datos reales disponibles

Aplicando los datos reales:

$$f = \frac{UC_{En} + UC_{Feb}}{HDD_{En} + HDD_{Feb}} = \frac{568 + 360}{500 + 400} = \frac{928}{900} = 1,0311 \frac{UC}{HDD}$$

Ecuación 2: Cálculo del factor de conversión

El valor obtenido (1,0311 UC/HDD) se utilizará para estimar el consumo de los meses de la temporada sin medición directa (octubre, noviembre, diciembre, marzo y abril). Este método garantiza que la reconstrucción del año completo esté anclada a datos reales y sea coherente con la climatología local.

Una vez determinado el factor de conversión, se procede a estimar el consumo para los meses de la temporada de calefacción que no disponen de datos medidos.

Para cada mes m sin registro, el consumo estimado se obtiene mediante:

$$UC_m = HDD_m \cdot f$$

Ecuación 3: Consumo estimado por mes

donde:

- UC_m = consumo estimado para el mes m [UC]
- HDD_m = grados-día base 15 °C del mes m [°C·día]
- f = factor de conversión UC/HDD obtenido en el Paso 1

Los meses con datos reales (enero y febrero) se mantienen sin alteración, mientras que para el resto se aplica el cálculo anterior. Los resultados por mes se reflejan en la Tabla 1.

Mes	HDD15°C	UC (real o estimado)	Tipo de dato
Octubre	150	154,67 ≈ 155	Estimado
Noviembre	300	309,33 ≈ 309	Estimado
Diciembre	450	464,00 ≈ 464	Estimado
Enero	500	568	Real
Febrero	400	360	Real
Marzo	250	257,78 ≈ 258	Estimado
Abril	100	103,11 ≈ 103	Estimado

Tabla 1: Consumo real y estimado por mes

Con el consumo mensual estimado para toda la temporada de calefacción, el siguiente paso consiste en expresar dichos valores en energía térmica utilizando un factor de conversión de Unidades de Consumo a kWh térmicos.

En sistemas con repartidores de costes, cada UC es proporcional a la energía térmica emitida por el radiador, y la relación exacta depende de la potencia nominal del emisor y del salto térmico medio (ΔT). Ante la ausencia de la curva de calibración exacta del proveedor, se adopta un factor de conversión conservador de:

$$1 UC \approx 1,6 kWh$$

Ecuación 4: Factor de conversión UC a kWh

Este valor está dentro del rango típico reportado por fabricantes y por el IDAE para radiadores de aluminio/acero en sistemas de calefacción a agua caliente con ΔT medio de 40–50 °C.

Mes	UC (real/estimado)	kWh térmicos (UC × 1,6)
Octubre	155	248,0
Noviembre	309	494,4
Diciembre	464	742,4
Enero	568	908,8
Febrero	360	576,0
Marzo	258	412,8
Abril	103	164,8
Total	2.217	3.547,2

Tabla 2: Consumo mensual en UC y kWh térmicos

En la Ilustración 5 se puede observar el consumo por meses, siendo diciembre, enero y febrero los meses con más consumo al ser los meses más fríos.

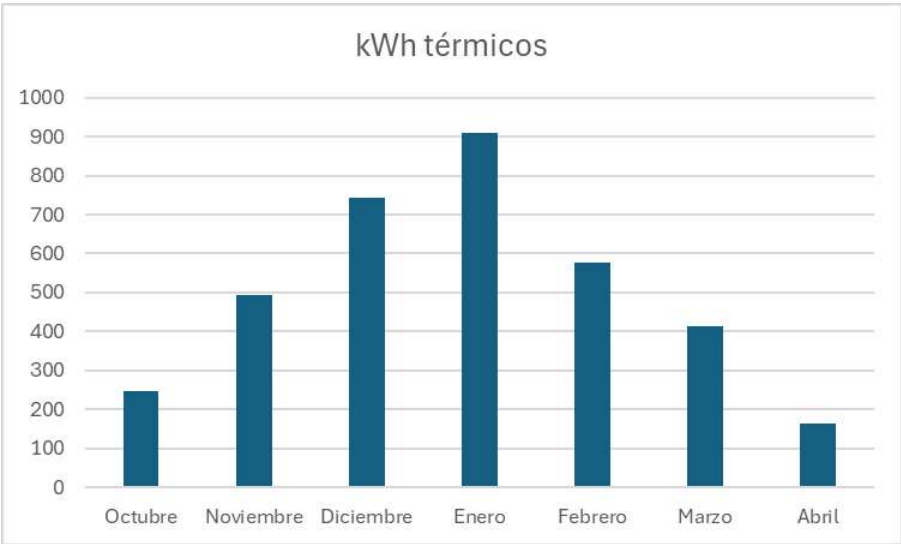


Ilustración 5: Consumo (kWh térmicos) por mes

El consumo térmico total estimado para una vivienda tipo durante la temporada de calefacción asciende a 3.547,2 kWh térmicos anuales. Este valor constituye la línea base del análisis energético, ya que permitirá evaluar con precisión el impacto de posibles medidas de mejora, como la sustitución del sistema de generación por tecnologías más eficientes.

La expresión del consumo en kWh térmicos facilita la comparación directa con otros sistemas, con independencia del combustible utilizado o de la tecnología de producción de calor, proporcionando así un marco objetivo para el análisis técnico y económico posterior.

Con el consumo térmico total estimado para una vivienda tipo en la temporada de calefacción (3.547,2 kWh térmicos/año), se procede a calcular los indicadores clave de desempeño (KPI) que permitan evaluar la eficiencia del sistema actual y compararlo con tecnologías alternativas.

El primer KPI es el consumo específico en kWh/m²·año, que se obtiene dividiendo el consumo anual por la superficie calefactada de la vivienda. En este caso, la superficie de la vivienda es de 180 m².

$$CE = \frac{E_{\text{Anual}}}{A_{\text{Calefactada}}} = \frac{3.547,2 \text{ kWh}}{180 \text{ m}^2} = 19,71 \frac{\text{kWh} \cdot \text{año}}{\text{m}^2}$$

Ecuación 5: Consumo específico

El valor 19,71 kWh/m²·año constituye la línea base del desempeño energético de la vivienda tipo para calefacción. Este KPI permitirá comparar de forma homogénea los distintos escenarios que se van a estudiar más adelante, independientemente de los cambios en tecnología o combustible

El segundo KPI calculado es el factor de carga (FC), que representa la relación entre la energía útil generada y la energía que se podría generar si la instalación funcionara a plena potencia nominal durante todo el periodo operativo.

$$FC = \frac{E_{\text{total}}}{P_{\text{instalada}} \cdot t}$$

Ecuación 6: Fórmula factor de carga

Donde:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{viv}} \cdot N_{\text{viv}} = 3547,2 \cdot 96 = 340.531,2 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$P_{\text{instalada}} = 700 \text{ kW}$$

$$t = (31 + 30 + 31 + 31 + 28 + 31 + 30) \cdot \frac{24}{2} = 2.544 \text{ h}$$

La energía total se ha calculado suponiendo que la energía de la vivienda estudiada es la misma en las 96 viviendas de la urbanización. La potencia instalada en la sala es de 700 kW y las horas de operación se han tenido en cuenta las 12 horas que está funcionando la calefacción en los meses de octubre-abril.

Con estos datos, se procede a calcular el factor de carga real.

$$FC = \frac{E_{\text{total}}}{P_{\text{instalada}} \cdot t} = \frac{340.531,2}{700 \cdot 2.544} = 0,191 = 19,1\%$$

Ecuación 7: Cálculo del factor de carga

El factor de carga del 19,1 % confirma que el sistema central opera la mayor parte del tiempo en condiciones de baja demanda, lo que reduce su eficiencia global. Esta baja utilización relativa de la potencia instalada supone una oportunidad clara para optimizar el rendimiento y reducir consumos mediante tecnologías con mejor comportamiento en carga parcial, como la aerotermia, o mediante mejoras de control y modulación en el sistema actual.

Coste energético anual del sistema actual

A partir de las facturas reales de calefacción que se han facilitado para el estudio por la vivienda correspondientes a los meses de enero (95,61 €) y febrero (64,98 €), y considerando un coste fijo mensual de 11,48 €, se obtiene un coste unitario medio ponderado de 0,1483 €/UC. Aplicando este valor al consumo estimado de la temporada completa (octubre-abril), se obtiene un gasto anual de 409,16 € por vivienda. Para las 96 viviendas de la urbanización, el coste total anual asciende a aproximadamente 39.279 €, considerando únicamente el servicio de calefacción.

4.2. Aerotermia centralizada

A partir de la línea base definida en el apartado anterior y de los indicadores energéticos obtenidos, resulta pertinente analizar alternativas tecnológicas que permitan reducir el consumo de energía primaria, los costes de operación y las emisiones asociadas. Entre las opciones disponibles, la aerotermia centralizada destaca por su elevado rendimiento estacional y su creciente implantación en entornos residenciales colectivos. En los apartados siguientes se examinará en detalle su principio de funcionamiento, viabilidad de integración en la urbanización estudiada, ventajas e inconvenientes, así como una estimación cuantitativa de su impacto energético, económico y medioambiental.

4.2.1. Descripción y principios de funcionamiento

La aerotermia se basa en bombas de calor aire-agua que extraen energía térmica del aire ambiente y la transfieren al circuito hidráulico de calefacción o agua caliente sanitaria. Utiliza el ciclo termodinámico de compresión de vapor: el refrigerante absorbe calor en el evaporador (aire exterior), y lo libera al circuito de agua a través del condensador. Esta tecnología ofrece elevados niveles de eficiencia estacional (SCOP), con valores típicos entre 3,0 y 4,0 en condiciones climáticas de Madrid, con impulsión

en torno a 40-45 °C. (8) En la Ilustración 6 se puede observar el esquema de un sistema de aerotermia.

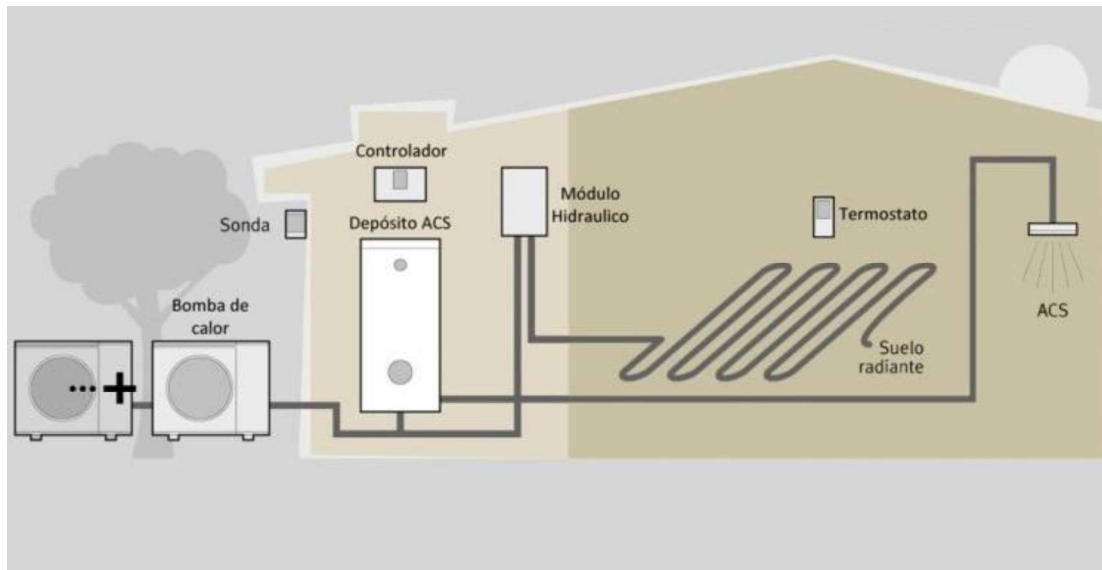


Ilustración 6: Esquema sistema de aerotermia centralizada. Fuente: Standard Hidráulica (9)

4.2.2. Integración en edificios existentes

En la urbanización estudiada, la aerotermia centralizada sustituiría o complementaría directamente al sistema de calderas existente, aprovechando la red de distribución actual y los emisores térmicos. Es crucial contar con bombas de calor capaces de operar en media temperatura, lo que permite minimizar modificaciones en radiadores e instalaciones hidráulicas, y asegurar confort térmico sin grandes reformas. (10)

4.2.3. Ventajas e inconvenientes técnicos y económicos

Ventajas:

- Alta eficiencia estacional (SCOP de 3 a 4, en climas medios como Madrid).
- Reducción inmediata de emisiones de CO₂ al eliminar la combustión local.
- Facilidad para integrar refrigeración y ACS en un único sistema.
- Compatible con sistemas de autoconsumo fotovoltaico.
- Reduce dependencia del gas natural.

Inconvenientes:

- Inversión de capital elevada (equipos, infraestructura eléctrica, adaptación).
- El COP baja en condiciones de frío extremo.
- Requiere espacio exterior para unidades exteriores (impacto paisajístico y acústico).
- Puede necesitar ajustes en emisores o aislamiento si se opera a temperaturas más bajas que el sistema actual.

4.2.4. Dimensionado y estimación de consumo

Partiendo del consumo térmico anual estimado para toda la comunidad (340.531 kWh térmicos) y suponiendo un SCOP promedio realista de 3,2, la demanda eléctrica estimada sería:

$$E_{\text{eléctrica}} = \frac{340,531}{3,2} = 106,416 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Ecuación 8: Demanda eléctrica estimada

Ese resultado muestra una reducción clara en demanda de energía primaria y una transición hacia un modelo con menor factura energética y menor huella de emisiones.

4.2.5. Proyección de ahorros

En la proyección de ahorros se va a distinguir entre dos tipos de ahorros, el ahorro económico y el ahorro de emisiones, ambos de gran importancia a la hora de estudiar el cambio en el sistema de calefacción.

Para poder realizar estos cálculos, es necesario conocer el precio medio de la electricidad para suministro comunitario en 2025, actualmente 0,135 €/kWh. (11) De esta manera, se puede calcular el coste anual estimado con el nuevo sistema.

$$\text{Coste} = 106416 \cdot 0,135 = 14366 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Ecuación 9: Coste sistema aerotermia centralizada

Una vez obtenido el coste del nuevo sistema, se compara con el coste del sistema actual, calculado previamente, 39279 €.

El ahorro económico entre ambos sistemas es de 24913€ por año.

El factor de emisión del gas natural según el MITECO es 0,204 kg CO₂/kWh PCI, mientras que el mix eléctrico español en 2024 tiene un factor medio de 0,15 kg CO₂/kWh (REE, avance del sistema eléctrico).

El sistema actual de gas natural, con un rendimiento medio estacional del 75 %, requiere una energía de entrada de:

$$E_{\text{gas}} = \frac{E_{\text{térmica}}}{\eta} = \frac{340.531}{0,75} = 454.041 \text{ kWh} \frac{\text{PCI}}{\text{año}}$$

Por tanto:

- Emisiones actuales:

$$454.041 \cdot \frac{0,204}{1000} = 92,6 \frac{\text{tCO}_2}{\text{año}}$$

- Emisiones con aerotermia:

$$106.416 \cdot \frac{0,15}{1000} = 15,96 \frac{\text{tCO}_2}{\text{año}}$$

Reducción anual: $\approx 76,6 \text{ tCO}_2$, equivalente a plantar más de 3.800 árboles maduros o retirar de la circulación 50 vehículos diésel de uso diario.

Este nivel de ahorro, tanto económico como medioambiental, junto con la reducción de dependencia de combustibles fósiles y la posibilidad de integrar autoconsumo fotovoltaico, posiciona a la aerotermia como una de las alternativas más competitivas para la renovación de la sala térmica. No obstante, la viabilidad económica final dependerá de la inversión inicial y de la posible obtención de ayudas públicas que podrían reducir significativamente el periodo de retorno.

4.3. Sistema híbrido aerotermia + gas

4.3.1. Descripción e integración

El sistema híbrido combina una bomba de calor aire-agua como generador principal en condiciones medias y una caldera de gas como apoyo en picos de demanda o temperaturas exteriores desfavorables. Esta configuración aprovecha la red hidráulica existente y permite escalar la aerotermia en módulos en cascada, manteniendo la caldera actual como respaldo. El control prioriza la aerotermia siempre que el COP/SCOP se mantenga por encima de un umbral predefinido, conmutando o mezclando con gas en función de la temperatura exterior y la temperatura de impulsión.

En la Ilustración 7 se muestra un esquema de principio de un sistema híbrido aerotermia–gas natural. La bomba de calor aerotérmica se conecta a la instalación mediante un intercambiador de placas y un depósito de inercia, cubriendo la mayor parte de la demanda térmica en condiciones normales. La caldera de gas natural actúa como apoyo en situaciones de picos de carga o cuando la temperatura exterior reduce la eficiencia de la aerotermia.

El sistema incluye además un colector de distribución hacia radiadores, suelo radiante y el depósito de ACS, garantizando así la cobertura completa de calefacción y agua caliente sanitaria. Este tipo de configuración permite optimizar el consumo energético, reduciendo la dependencia del gas al mismo tiempo que se asegura la continuidad del servicio.

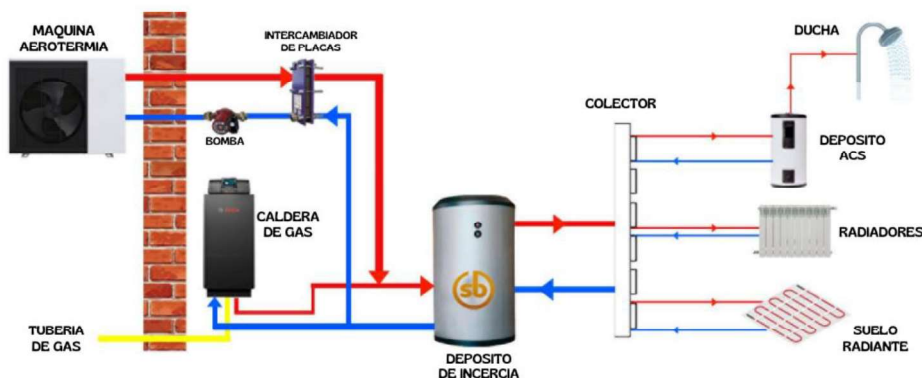


Ilustración 7: Esquema híbrido gas + aerotermia. Fuente: Instalaciones Sánchez Braojos (12)

4.3.2. Ventajas e inconvenientes

Ventajas: alta eficiencia en gran parte del año, reducción de emisiones y costes, y continuidad de servicio gracias a la redundancia.

Inconvenientes: complejidad de control, necesidad de espacio para ambos equipos y persistencia parcial de emisiones asociadas al gas.

4.3.3. Proyección de ahorros

Para cuantificar el impacto energético y económico de la solución híbrida aerotermia + gas, se parte de la demanda térmica anual calculada previamente (340531 kWh/año para el conjunto de viviendas). El criterio de reparto de la cobertura entre tecnologías se basa en las características climáticas de Madrid y en datos de rendimiento medio de bombas de calor aire-agua en sistemas de calefacción a media temperatura.

En estos tipos de escenario, la aerotermia asume entre el 70% y el 85% de la demanda térmica anual, operando con un SCOP medio de 3,2 en el rango de temperaturas típico de la temporada de calefacción en Madrid. En este caso, asumiendo una postura conservadora, se fija valor de 70% para la aerotermia. El 30 % restante es cubierto por la caldera de gas existente, manteniendo su rendimiento estacional actual. (13)

Se consideran los precios energéticos y factores de emisión de referencia para 2025, según los organismos citados en apartados anteriores: 0,135 €/kWh para electricidad y 0,080 €/kWh PCI para gas natural. Los factores de emisión aplicados son 0,15 kgCO₂/kWh para electricidad y 0,204 kgCO₂/kWh PCI para gas.

Resultados de la estimación:

- Cobertura térmica aerotermia: 238.372 kWh/año → consumo eléctrico = 74.491 kWh/año.
- Cobertura térmica gas: 102.159 kWh/año → consumo PCI = 136.212 kWh/año.

- Coste anual electricidad: 10.056 €.
- Coste anual gas: 10.897 €.
- Coste total anual: 20.953 €.
- Ahorro frente al sistema actual: 18.326 € anuales (~47 % de reducción).
- Emisiones totales: 38,97 tCO₂/año (reducción de ~53,6 tCO₂/año respecto a la situación actual).

El sistema híbrido permite una reducción significativa tanto de costes como de emisiones gracias a que la aerotermia cubre la mayor parte de la temporada, con un rendimiento superior al de la caldera de gas. No obstante, al mantener un 30 % de la carga cubierta con gas, las emisiones no se eliminan completamente. Este compromiso entre inversión, ahorro y reducción de huella de carbono convierte la opción híbrida en una alternativa técnicamente viable y económicamente atractiva para la urbanización, especialmente si se prioriza una implantación gradual y se valora la redundancia como elemento de seguridad en el suministro térmico.

4.4. Optimización del sistema de gas actual

La optimización del sistema centralizado de calefacción a gas existente plantea actuar sobre el control, la regulación y la distribución térmica para mejorar el rendimiento global, reduciendo el consumo de gas y las emisiones sin sustituir la tecnología principal. Este enfoque se basa en medidas técnicas de bajo coste y rápida implantación, alineadas con las recomendaciones de empresas especializadas en servicios energéticos y fabricantes de equipos.

4.4.1. Descripción de la propuesta

Las actuaciones consideradas incluyen:

- Incorporación de variadores de frecuencia en bombas de circulación, que permiten ajustar el caudal a la demanda real en cada instante, reduciendo consumos eléctricos y pérdidas de calor. (14)
- Optimización de la curva de compensación climática, de forma que la temperatura de impulsión se adapte a la temperatura exterior, disminuyendo pérdidas por transmisión y mejorando el confort.
- Mejora del aislamiento térmico en redes de tuberías y válvulas, especialmente en sala de calderas y espacios no calefactados, para reducir pérdidas. (15)

En la Ilustración 8 se ilustran variadores de frecuencia Siemens Sinamics, cuya aplicación en bombas y ventiladores de la instalación permitiría ajustar el caudal a la demanda real, reduciendo consumos innecesarios y mejorando la eficiencia energética global del sistema.



Ilustración 8: Variadores de frecuencia. Fuente: Siemens (10)

4.4.2. Ventajas e inconvenientes

Ventajas:

- Inversión inicial reducida: las mejoras como variadores de frecuencia, equilibrado hidráulico y aislamiento adicional tienen un coste mucho menor que sustituir toda la generación térmica.
- Periodo de retorno rápido: en instalaciones existentes, la incorporación de controles y optimización hidráulica puede amortizarse en 2–4 años gracias al ahorro de combustible y electricidad. (16)

Inconvenientes:

- Ahorro energético limitado: aunque se mejora el rendimiento, el sistema sigue 100 % dependiente de gas.
- Baja reducción de emisiones en comparación con tecnologías renovables.

4.4.3. Proyección de ahorros

A partir de la demanda térmica anual calculada en el apartado anterior (340.531 kWh/año) y considerando un rendimiento estacional actual de 0,75, se estima que las mejoras propuestas pueden elevarlo hasta 0,85. Este valor se encuentra dentro de los incrementos de eficiencia alcanzables según estudios de optimización de calderas y redes de distribución en el sector residencial.

Resultados de la estimación:

- Consumo PCI actual: 453.975 kWh/año.
- Consumo PCI tras mejoras: 400.624 kWh/año.
- Coste anual gas (0,080 €/kWh PCI): 32.050 €.
- Ahorro frente al sistema actual: 7.229 €/año (~18,4 % de reducción).

- Emisiones totales: 81,73 tCO₂/año (reducción de ~10,6 tCO₂/año).

La optimización del sistema de gas ofrece mejoras rápidas y a bajo coste, con un ahorro energético y de emisiones moderado. Puede actuar como medida transitoria mientras se planifica una transición hacia tecnologías renovables, minimizando la inversión inicial y mejorando la eficiencia de la infraestructura existente.

4.5. Conclusiones comparativas de las alternativas de mejora

El presente apartado recoge una comparación técnica y energética entre las tres alternativas evaluadas para la mejora del sistema de calefacción en la urbanización:

La evaluación se ha realizado tomando como referencia los indicadores calculados en apartados anteriores, con datos reales de consumo y coste de la instalación existente, y con estimaciones obtenidas a partir de los rendimientos y coberturas definidos para cada opción. En este apartado, se va a determinar que opción se considera óptima para realizar el posterior análisis económico para evaluar la rentabilidad de este proyecto en comparación con el sistema actual de calefacción.

En la Tabla 3 se puede observar la comparativa de las tres alternativas con los resultados obtenidos a lo largo del trabajo.

Indicador	Aerotermia Centralizada	Sistema Híbrido Aerotermia + Gas	Optimización Gas Actual
Consumo anual (aerotermia: kWh _e ; gas: kWh PCI)	106.416	192.338	400.624
Coste anual (€)	14.366	20.953	32.050
Emisiones anuales (tCO ₂)	15,96	38,97	81,73
Reducción consumo (%)	76,6 %	57,6 %	11,8 %
Reducción emisiones (%)	82,8 %	57,9 %	11,7 %
Inversión inicial	Alta	Media	Baja

Tabla 3: Comparativa de resultados económicos y energéticos

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, a continuación, se presentan varios gráficos comparativos que muestran de forma visual las diferencias entre las tres alternativas evaluadas. En ellos se representa el consumo energético anual y las emisiones de CO₂. Esta representación gráfica permite identificar de un solo vistazo las ventajas relativas de cada tecnología y refuerza las conclusiones derivadas del análisis numérico.

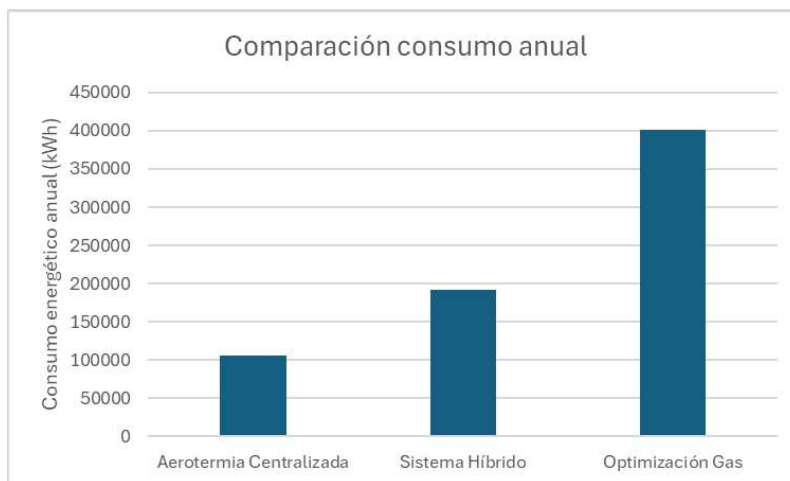


Ilustración 9: Comparación consumo anual. Fuente: Elaboración propia

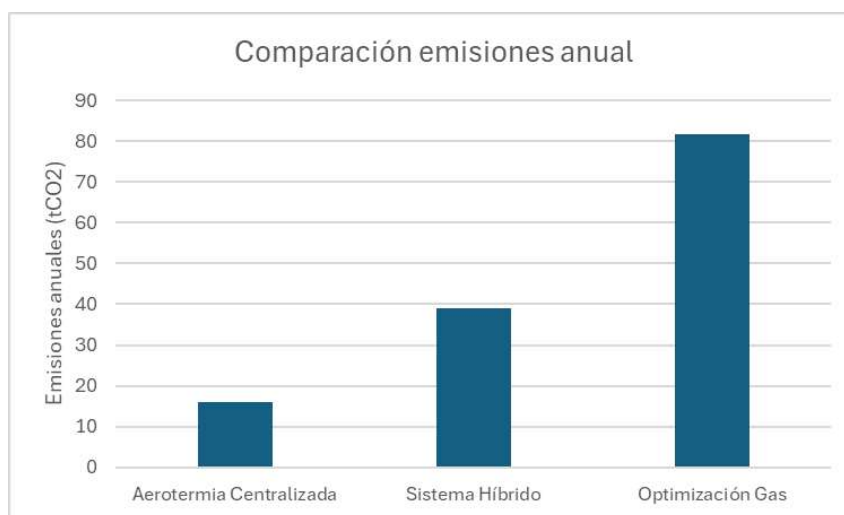


Ilustración 10: Comparación emisiones anuales. Fuente: Elaboración propia

El análisis comparativo evidencia que la aerotermia centralizada es la alternativa con mayor potencial de reducción tanto en consumo energético como en emisiones de CO₂, alcanzando ahorros del 76,6 % en consumo y del 82,8 % en emisiones respecto al sistema actual. Aunque su inversión inicial es elevada y su implantación implica una mayor complejidad técnica, ofrece un rendimiento claramente superior al resto de opciones, lo que garantiza un aprovechamiento más eficiente de la energía eléctrica y una menor dependencia de combustibles fósiles.

El sistema híbrido aerotermia + gas presenta un ahorro intermedio (57,6 % en consumo y 57,9 % en emisiones) y una inversión moderada, constituyendo una opción viable como medida de transición. Sin embargo, su rendimiento medio y su dependencia parcial del gas limitan sus beneficios a medio y largo plazo.

La optimización del sistema de gas actual, si bien es la opción con menor coste de implantación y menor complejidad, ofrece una reducción de consumo y emisiones muy limitada (11,8 % y 11,7 %, respectivamente). Se perfila más como una medida temporal

de eficiencia que como una solución definitiva alineada con los objetivos de descarbonización.

En conjunto, considerando la eficiencia energética, la reducción de emisiones, la resiliencia frente a la volatilidad de precios energéticos y las tendencias regulatorias, la aerotermia centralizada se posiciona como la solución más ventajosa a largo plazo para la urbanización, siempre que se acompañe de un plan de financiación adecuado que permita amortizar la inversión inicial en un plazo razonable.

Dada la clara ventaja técnica y ambiental de la aerotermia centralizada frente a las demás alternativas, el siguiente apartado se centrará en su evaluación económica detallada. Este análisis incluirá la estimación de la inversión inicial necesaria, los costes de operación anuales, los ahorros previstos respecto al sistema actual y el cálculo del periodo de retorno de la inversión. De este modo, se dispondrá de una visión completa que combine el rendimiento energético y la viabilidad financiera, permitiendo fundamentar la decisión final con criterios tanto técnicos como económicos.

4.6. Análisis económico aerotermia centralizada

4.6.1. Alcance y método

Se estima la inversión (CAPEX) y los costes de operación (OPEX) de sustituir la sala de calderas por un sistema aerotérmico centralizado aire-agua modular para calefacción. Se comparan los costes anuales resultantes con la línea base obtenida de la facturación real de la comunidad, y se calcula el periodo de retorno simple.

Los datos de partida que se han calculado previamente son los siguientes:

- Demanda térmica anual: 340.531 kWh_t/año
- Consumo eléctrico estimado de aerotermia: 106.416 kWh_e/año
- Coste actual de calefacción en la urbanización: 39.279 €/año

Además, como referencia, la vida útil de referencia de la aerotermia es de 15-20 años en aplicaciones residenciales. Este dato es clave a la hora de realizar el análisis económico. (17)

4.6.2. Inversión (CAPEX)

La inversión inicial necesaria para implantar un sistema de aerotermia centralizada aire-agua en una urbanización de 96 viviendas depende fundamentalmente de tres factores:

1. Potencia térmica requerida para cubrir la demanda punta.
2. Precio por kW térmico instalado, que incluye el coste de los módulos de bomba de calor, el sistema hidráulico, la interconexión, la obra civil y la integración con la instalación existente.
3. Estrategia de diseño.

A partir de los datos de consumo anual de calefacción obtenidos (340.531 kWh_t/año), y considerando el patrón de uso típico de sistemas centralizados en entornos residenciales, la potencia térmica instalada debe cubrir la demanda máxima que se produce en los días más fríos de la temporada. En este tipo de instalaciones, la carga media anual suele ser considerablemente inferior a la potencia máxima, lo que provoca un factor de carga reducido. Este comportamiento, habitual en climas como el de Madrid, implica que una parte importante de la capacidad instalada solo se utiliza durante periodos cortos, por lo que el sobredimensionamiento puede penalizar la rentabilidad de la inversión.

El coste de inversión o CAPEX de un sistema de aerotermia centralizada se calcula a partir de la potencia térmica necesaria y el coste unitario por kW térmico instalado, siguiendo la relación reflejada en la Ecuación 10.

$$\text{CAPEX} [\text{€}] = P_{\text{térmica}} [\text{kW}] \cdot C_{\text{unitario}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right]$$

Ecuación 10: Fórmula CAPEX

La demanda anual de calefacción de la urbanización es de 340,53 MWh_t/año. Para dimensionar la potencia térmica instalada, utilizaremos el criterio de potencia específica por superficie, que es consistente con criterios de dimensionado prácticos.

Siguiendo ejemplos de instalaciones similares con éxito en Madrid, se va a aplicar 40 W/m₂ para el cálculo de la demanda térmica de calefacción a efecto de dimensionado real de potencias térmicas. (18)

Considerando que la superficie total de la urbanización es:

$$S_{\text{total}} = 96 \text{ viviendas} \cdot 180 \frac{\text{m}^2}{\text{viviendas}} = 17.280 \text{m}^2$$

La potencia térmica estimada se calcula como:

$$P_{\text{térmica}} = S_{\text{total}} \cdot \frac{40 \text{W}}{\text{m}^2} = 17.280 \text{ m}^2 \cdot 40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 691,2 \text{ kW}$$

Por simplicidad, se redondea la potencia térmica a 700 kW, valor de potencia de referencia para el dimensionado del sistema aerotérmico.

Para cubrir la demanda térmica de calefacción estimada en ≈ 700 kW para la urbanización (96 viviendas, 17.280 m², carga de diseño 40 W/m²), se propone la instalación de un sistema modular de bombas de calor aire-agua de alta eficiencia en configuración centralizada.

Se selecciona como referencia la gama Mitsubishi Electric e-Series (fluido R32), diseñada para aplicaciones comerciales e industriales con requerimientos medios y altos de potencia. Según catálogo del fabricante, cada módulo ofrece una potencia térmica nominal de entre 150 y 180 kW en modo calefacción, pudiendo conectarse en cascada hasta alcanzar 1.080 kW de potencia total instalada Mitsubishi Electric – Catálogo e-Series R32.

La configuración propuesta consiste en 4 módulos de 180 kW, lo que proporciona una potencia total de 720 kW térmicos. Esta disposición presenta varias ventajas frente a una única unidad de gran potencia:

- Escalabilidad y modularidad: permite ajustar la potencia disponible a la demanda real, mejorando el rendimiento en carga parcial y reduciendo los arranques/paradas.
- Redundancia: si un módulo requiere mantenimiento, el resto puede seguir en funcionamiento, asegurando continuidad de servicio.
- Facilidad de transporte e instalación: los módulos individuales pueden manipularse más fácilmente que una única unidad de gran tamaño, reduciendo costes logísticos y de obra.
- Optimización de consumo: la gestión en cascada permite priorizar el funcionamiento de módulos con mejor COP en cada momento.

Con esta configuración, la potencia total instalada supera ligeramente la demanda calculada, proporcionando un margen de seguridad frente a picos de consumo en días de diseño y posibles pérdidas adicionales por distribución.

El precio de tarifa por módulo EAHV-M1800YCL-N (180kW) es de £ 48700 por unidad, como queda reflejado en la Ilustración 11.



e-Series EAHV
R32 Modular Air Source Heat Pump

Model Reference	Capacity (kW)		EER ¹	SEER ²	COP ²	Price (£)
	Cooling (Comfort) ³	Heating ³				
EAHV-M1500YCL-N 	150.0	150.0	3.28	5.52 (217.8%)	3.52	45,362
EAHV-M1800YCL-N 	180.0	180.0	3.07	5.36 (211.4%)	3.39	48,700

 Three Phase
Notes: Price includes: PAR-W31MAA controller and end-cap. *1 Under normal cooling conditions at outdoor temp 35°CDB/24°CWB, outlet water temp 7°C, inlet water temp 12°C. *2 Under normal heating conditions at outdoor temp 7°CDB/6°CWB, outlet water temp 45°C, inlet water temp 40°C. *3 Based on EN14511.

Ilustración 11: Ficha técnica EAHV-M1800YCL-N. Fuente: RutamSoft (19)

El precio de los 4 módulos, por lo tanto, es de £194800, unos 225000 € aproximadamente.

En el presente estudio, el coste de mano de obra se ha estimado considerando un escenario de instalación favorable, en el que se aprovechan al máximo los elementos existentes y se reduce al mínimo el trabajo.

Bajo estas condiciones, el montaje mecánico se realizaría con un equipo de tres tuberos y un supervisor durante seis días, lo que supondría aproximadamente 9000 €. Los trabajos eléctricos (potencia y control), con dos electricistas y un ayudante durante

tres días, representarían alrededor de 3.000 €. La integración requeriría la intervención de un ingeniero de control durante dos días, que supone unos 1000 € mientras que la coordinación de obra, prevención de riesgos laborales y documentación se estiman en 500 €. (20) (21)

En total, la mano de obra para la instalación de los cuatro módulos de 180 kW se sitúa en el entorno de 13500 €. Esta cifra se considera una estimación razonable y está condicionada al cumplimiento de los supuestos favorables mencionados.

De esta forma, sumando la inversión en los módulos y la instalación de estos, el CAPEX queda reflejado en la Ecuación 11.

$$CAPEX = 225000 + 13500 = 238500 \text{ €}$$

Ecuación 11: CAPEX final aerotermia

4.6.3. OPEX

Se considera que el coste fijo anual asociado al mantenimiento de la nueva central aerotérmica será equivalente al del sistema actual, dado que la configuración general de la explotación no experimentará cambios significativos. La red de distribución de calor, los elementos de control y regulación y la estructura organizativa de supervisión ya existentes se mantendrán operativos, por lo que no se prevé un incremento de recursos humanos ni de horas de servicio dedicadas. El contrato de mantenimiento vigente para la instalación centralizada cubre actualmente labores de inspección, limpieza, verificación de parámetros, sustitución de componentes menores y gestión de incidencias.

Asimismo, la aerotermia, al eliminar elementos propios de la combustión como quemadores, intercambiadores de humos o chimeneas, podría incluso simplificar algunas operaciones preventivas y reducir la frecuencia de recambios específicos. No obstante, dado que el cambio de tecnología implica la incorporación de equipos con compresores y electrónica de potencia, se mantendrán las revisiones periódicas previstas por el fabricante para preservar la garantía y asegurar el rendimiento óptimo. En conjunto, esta transición tecnológica no se estima que suponga variaciones relevantes en el OPEX fijo. Al no suponer ningún cambio, no se calcula el valor ya que no añade valor de cara al plan económico.

Volviendo a la Ecuación 9, se observa que el coste anual de la energía eléctrica necesaria para cubrir la demanda térmica anual de la instalación asciende a 14.366 € cuando se emplea un valor de SCOP = 3,20.

No obstante, según el catálogo del fabricante (Ilustración 11), el modelo de bomba de calor considerado presenta un COP nominal de 3,39 en condiciones de ensayo normalizadas. Este valor corresponde a un punto de operación concreto, que podría alcanzarse de forma sostenida en situaciones óptimas de control y operación. Si se asumiera este valor como rendimiento medio estacional, el coste energético anual se reduciría de manera apreciable, situándose en torno a 13.551 €, lo que supondría un ahorro adicional de aproximadamente 815 € al año.

Sin embargo, y con el fin de mantener una aproximación conservadora y técnicamente sólida, se adopta SCOP = 3,20 como hipótesis de cálculo principal. De este modo, se evita sobreestimar los ahorros potenciales y se asegura que los resultados del análisis económico sean precisos incluso en escenarios menos favorables de operación.

4.6.4. Periodo de retorno simple

A partir de los valores calculados para el coste de operación (OPEX) del sistema actual y de la solución propuesta con aerotermia centralizada, es posible estimar el periodo de retorno simple de la inversión. El CAPEX total estimado para la instalación de aerotermia asciende a 238.500 €, mientras que el OPEX anual del sistema actual (únicamente en términos de consumo energético) se sitúa en 39.279 €/año. El OPEX equivalente para la aerotermia, es de 14.366 €/año.

El ahorro energético anual resultante es, por tanto:

$$\text{Ahorro anual} = 39279 - 14366 = 24913 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Ecuación 12: Ahorro anual aerotermia

Aplicando a la ecuación del periodo de retorno simple:

$$\text{Payback} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{238.500}{24.913} \approx 9,6 \text{ años}$$

Ecuación 13: Payback aerotermia

Este valor indica que, bajo las condiciones actuales de precios energéticos y sin considerar subvenciones o deducciones fiscales, la inversión en aerotermia centralizada quedaría amortizada en algo menos de una década.

Este es el retorno sin ayudas económicas. Si se accede a ayudas públicas existen dos tipos, subvención fija para aerotermia en comunidades de vecinos y deducciones fiscales en el IRPF por mejora energética.

La ayuda autonómica fija es de 15.000 para proyectos colectivos, como es el caso de esta comunidad de vecinos. (22) Teniendo en cuenta este dato, el periodo de retorno simple es el siguiente:

$$\text{Payback} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{223.500}{24.913} \approx 9 \text{ años}$$

Ecuación 14: Payback aerotermia con subvención

Las deducciones fiscales en el Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas (IRPF) previstas en el Real Decreto-ley 19/2021, de 5 de octubre, y ampliadas por el Real Decreto-ley 18/2022, permiten a los propietarios de viviendas beneficiarse de importantes reducciones en su cuota tributaria cuando se acometen obras de mejora de la eficiencia energética en edificios residenciales.

En el caso de comunidades de vecinos, estas deducciones son aplicables siempre que:

- La actuación afecte al conjunto del edificio (no a una sola vivienda) y suponga una mejora de la eficiencia energética, ya sea reduciendo el consumo de energía primaria no renovable en al menos un 30 % o alcanzando una calificación energética A o B, tal y como se acredita mediante un Certificado de Eficiencia Energética emitido antes y después de la obra.
- La obra esté debidamente facturada a nombre de la comunidad de propietarios y el pago se realice por medios que permitan trazabilidad bancaria.
- Cada propietario declare en su IRPF la cuota proporcional del coste total de la obra correspondiente a su coeficiente de participación en la comunidad.

En este marco, los propietarios pueden deducir hasta un 60 % de la inversión imputable a su vivienda, con un límite máximo de 15.000 € de base de deducción por contribuyente. Esto significa que, para una instalación de aerotermia centralizada en una comunidad, cada vecino podría beneficiarse directamente de esta deducción en su declaración de la renta, reduciendo de manera significativa el periodo de retorno de la inversión. (23) (24)

Para aplicar esta deducción fiscal y conocer la cantidad exacta deducida, se va a suponer que se paga a partes iguales. De esta forma, la inversión por vivienda es la siguiente:

$$\text{Inversión por vivienda} = \frac{238.500}{96} \approx 2.483,85 \text{ €}$$

Ecuación 15: Inversión por vivienda

Como este valor está por debajo del límite máximo de 15.000€, cada propietario podrá deducir el 60% de la totalidad de su aportación.

$$\text{Deducción} = 2.483,85 \cdot 0,60 \approx 1.490,31 \text{ €}$$

Ecuación 16: Deducción por vivienda

Cada propietario reducirá su cuota de IRPF en 1.490 € el año o años en que se impute el gasto. Para este cálculo se asume que todos los propietarios de la comunidad tienen ingresos anuales suficientes como para generar una cuota íntegra de IRPF superior a 1.500 €, lo que les permite aplicar íntegramente la deducción fiscal del 60 % sobre su aportación a la inversión. Bajo esta hipótesis, cada vecino se beneficiaría del importe máximo que le corresponde, reduciendo de forma efectiva el coste de la actuación y acortando significativamente el periodo de retorno de la inversión.

El nuevo CAPEX sería de 95.430€ y por lo tanto el nuevo período de retorno simple es el siguiente:

$$\text{Payback} = \frac{95.430}{24.913} \approx 3,83 \text{ años}$$

Ecuación 17: Payback con deducción sobre IRPF

Esto significa que, gracias a la deducción fiscal del 60 %, la instalación se amortizaría en menos de 4 años, lo que mejora notablemente la viabilidad del proyecto.

Para facilitar la comprensión de los resultados y comparar visualmente el impacto de las diferentes ayudas en el periodo de retorno, se ha generado la Ilustración 12. En este gráfico se representa la evolución del balance acumulado (€) desde la inversión inicial, considerando únicamente el OPEX variable como diferencia entre escenarios. Se observa cómo el escenario con deducción fiscal presenta una recuperación de la inversión notablemente más rápida, alcanzando el equilibrio en torno al año 3,8, mientras que con ayuda autonómica el retorno se sitúa cerca de los 8,9 años, y sin ayudas se prolonga hasta los 9,6 años.

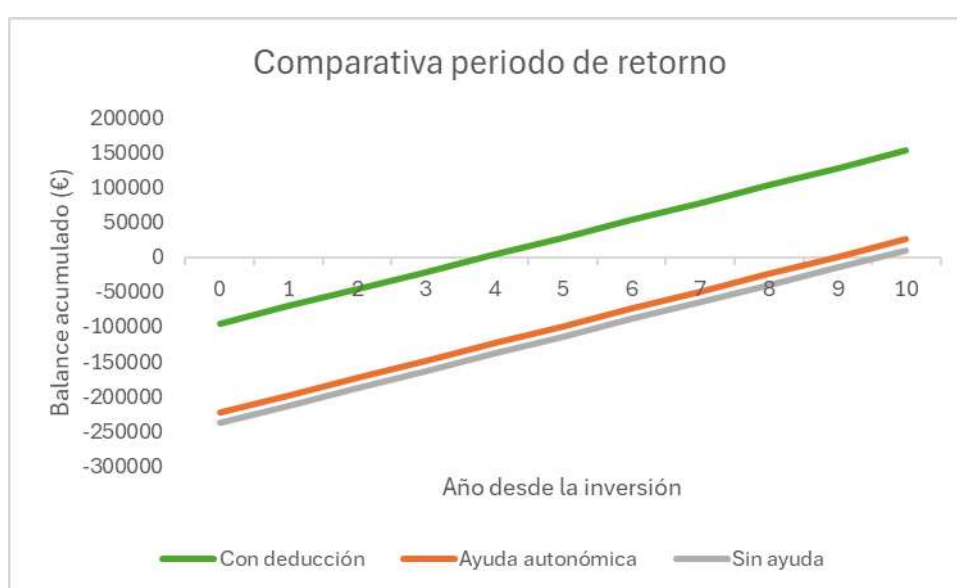


Ilustración 12: Comparativa periodos de retorno

4.6.5. Análisis de rentabilidad con Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)

Tras el cálculo del Periodo de Retorno Simple se va a ampliar el análisis económico mediante indicadores que consideren el valor del dinero en el tiempo y la rentabilidad real del proyecto. Los dos más utilizados en la evaluación de inversiones son el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

El VAN permite conocer si una inversión crea valor, actualizando los flujos de caja futuros a una fecha de referencia mediante una tasa de descuento.

La fórmula del VAN es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

Ecuación 18: Fórmula VAN

Donde FC_t son los ahorros netos anuales (diferencia de OPEX variable entre el sistema actual y la aerotermia), r es la tasa de descuento y n el horizonte en años.

El TIR indica la tasa de descuento para la cual el VAN es cero. Representa la rentabilidad anual implícita del proyecto y permite compararlo con otras alternativas de inversión.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - CAPEX$$

Ecuación 19: Fórmula TIR

Utilizando los datos de los apartados anteriores, faltaría fijar el horizonte y la tasa de descuento. La vida útil de un sistema de aerotermia se sitúa alrededor de los 20 años, por lo tanto, este será el horizonte. Respecto a la tasa de descuento, se va a suponer un 3%. (25)

El valor presente de los ahorros es el mismo para los tres escenarios y es el siguiente:

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + r)^t} = \sum_{t=1}^{20} \frac{24.913}{(1 + 0,03)^t} = 370.642,53 \text{ €}$$

Con este dato, se puede calcular el VAN para cada escenario fijado en el anterior apartado.

- VAN (Sin ayudas). VAN = 132.142,53 €
- VAN (Ayuda autonómica). VAN = 147.142,53 €
- VAN (Con deducción fiscal). VAN = 275.212,53 €

Resolviendo la Ecuación 19, se calcula el TIR para cada escenario.

- TIR (Sin ayudas). TIR = 8,34 %
- TIR (Ayuda autonómica). TIR = 9,25 %
- TIR (Con deducción fiscal). TIR = 25,84%

En la Tabla 4 se puede observar una comparativa de los diferentes escenarios de una manera más visual.

Escenario	CAPEX neto (€)	VAN a 20 años (3 %)	TIR
Sin ayudas	238.500	132.142 €	8,34 %
Ayuda autonómica (15.000 €)	223.500	147.143 €	9,25 %
Deducción fiscal 60 %	95.430	275.213 €	25,84 %

Tabla 4: Comparativa VAN y TIR distintos escenarios

El análisis económico con una tasa de descuento del 3 % confirma la viabilidad de la aerotermia centralizada. En el escenario sin ayudas, el proyecto presenta un VAN de

132.142 € y una TIR del 8,3 %, lo que ya demuestra rentabilidad frente al coste de capital esperado en una comunidad residencial.

Cuando se incluyen las ayudas autonómicas, el VAN asciende a 147.143 € y la TIR crece hasta el 9,25 %, reforzando la solidez financiera de la inversión. El escenario con deducción fiscal del 60 % resulta aún más favorable: el VAN supera 275.000 €, lo que refleja una gran rentabilidad.

En conjunto, los resultados muestran que la aerotermia no solo es técnicamente viable, sino que también constituye una opción económicamente atractiva para la comunidad de vecinos.

4.7. Análisis de emisiones del sistema de calefacción

La comparación de escenarios realizada en la Tabla 3 no solo permite evaluar la viabilidad económica de cada alternativa, sino también su impacto ambiental directo en forma de emisiones de CO₂. En la situación actual, con una instalación basada íntegramente en calderas de gas natural, la comunidad presenta unas emisiones asociadas cercanas a 93 toneladas de CO₂ anuales. Este nivel de emisiones refleja la fuerte dependencia de un combustible fósil y constituye la principal contribución de la urbanización a su huella de carbono.

El cambio a un sistema de aerotermia centralizada supondría una transformación radical desde el punto de vista sostenible. Tal como muestran los cálculos, las emisiones anuales se reducirían a menos de 16 toneladas de CO₂, lo que representa un recorte superior al 80 % respecto a la situación actual. Esta disminución tan significativa coloca a la comunidad en una senda de descarbonización alineada con los objetivos de la Estrategia Europea de Renovación de Edificios y con la meta nacional de neutralidad climática en 2050. Dicho de otro modo, con la implantación de este sistema, la urbanización se situaría por delante de muchas otras comunidades residenciales en materia de eficiencia energética y compromiso ambiental.

Más allá de la reducción directa de emisiones, la aerotermia abre la posibilidad de integrar en el futuro otros vectores de sostenibilidad, como el autoconsumo fotovoltaico, que permitiría cubrir parte de la demanda eléctrica de las bombas de calor con energía 100 % renovable. Esto potenciaría aún más la reducción de la huella de carbono, acercando a la comunidad al concepto de edificio de consumo casi nulo (nZEB).

En términos reputacionales, la transición a una calefacción sin gas natural no solo mejoraría la calificación energética del edificio, sino que reforzaría la imagen de la comunidad como referente en eficiencia y sostenibilidad dentro del parque residencial urbano. Además, tendría un efecto pedagógico y de sensibilización entre los residentes, al evidenciar que las decisiones colectivas pueden tener un impacto tangible en la lucha contra el cambio climático.

4.8. Conclusiones parciales del capítulo de calefacción

La comparación cuantitativa confirma que la aerotermia centralizada es la alternativa más eficaz para descarbonizar la calefacción: reduce las emisiones en $\approx 83\%$ y el coste energético anual frente al sistema actual, manteniendo la compatibilidad con la red de radiadores existente. El sistema híbrido constituye una solución de transición interesante (-58% de CO_2) cuando se desea mantener la caldera como respaldo o escalar por fases, si bien su beneficio ambiental y económico queda por debajo del 100% aerotérmico. La optimización del gas ofrece ahorros modestos ($\approx 12\%$) con inversión baja y rápida ejecución; es recomendable como medida puente mientras se tramita la sustitución del generador.

Desde el punto de vista económico (VAN/TIR y payback calculada), la aerotermia es viable sin ayudas y muy atractiva con deducciones/ayudas; ahora, con el análisis de emisiones, se refuerza su prioridad estratégica: maximiza la reducción de CO_2 de forma estable, reduce la exposición al precio del gas y abre la puerta a integrar fotovoltaica y gestión inteligente de la demanda térmica. En consecuencia, se recomienda planificar la migración a aerotermia centralizada con una fase previa de optimización y control del sistema actual (para obtener ahorros inmediatos) y una fase de despliegue con módulos en cascada que permitan escalar potencia y mantener servicio durante la obra.

5. Optimización energética de la piscina comunitaria

5.1. Sistema actual y supuestos de partida

5.1.1. Geometría y volúmenes

El recinto cuenta con dos vasos exteriores: uno principal y otro infantil, con uso estacional (verano) y operación diurna.

Vaso principal (adultos): $20 \times 10 \text{ m} \rightarrow A = 200 \text{ m}^2$. La profundidad es variable; desde 1 metro hasta los 3 metros. Para el cálculo, se adopta $\bar{h} = 2 \text{ m} \Rightarrow V \approx 400 \text{ m}^3$.

Vaso infantil: $10 \times 4 \text{ m} \rightarrow A = 40 \text{ m}^2$. Profundidad uniforme estimada $h = 0,4 \text{ m} \Rightarrow V \approx 16 \text{ m}^3$.

Este recinto se puede observar en la Ilustración 13.

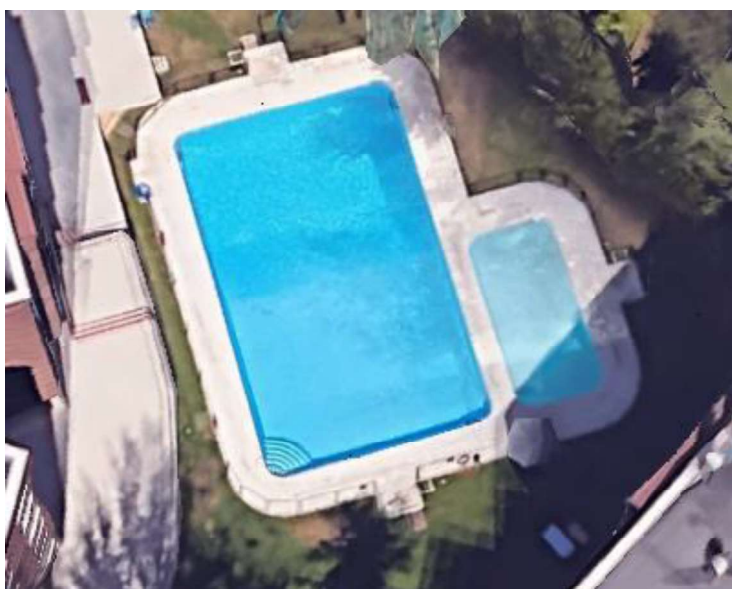


Ilustración 13: Piscina comunitaria. Fuente: Google Earth

5.1.2. Uso y régimen operativo

- Temporada de servicio: junio–septiembre (≈ 120 días/año).
- Horario de ocupación: 10:00–21:00.
- Consigna de agua para confort: $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (rango habitual $25\text{--}27 \text{ }^{\circ}\text{C}$).
- En periodos sin uso, la evaporación es el mecanismo de pérdida térmica dominante; durante horas de viento y baja humedad se incrementa notablemente.

5.1.3. Circuito hidráulico y equipos existentes

Según la información facilitada por la comunidad de propietarios, el sistema de depuración y circulación de las piscinas se basa en un esquema convencional compuesto por bomba de impulsión, filtros de arena y sistema de cloración química.

El agua de los vasos (piscina principal de 20 × 10 m y piscina infantil de 10 × 4 m) es recogida a través de skimmers perimetrales, desde donde se conduce mediante tuberías al grupo de bombeo principal. Este equipo, de velocidad fija, garantiza el caudal de recirculación necesario para mantener la calidad del agua, aunque no dispone de variador de frecuencia que permita adaptar el régimen de funcionamiento a la demanda real.

A la salida de la bomba, el agua pasa por los filtros de arena, que constituyen el sistema principal de tratamiento físico, eliminando sólidos en suspensión y garantizando la transparencia del agua. La desinfección se realiza mediante un sistema de dosificación de cloro líquido, de funcionamiento automático, pero sin regulación avanzada de pH, lo que implica que parte del ajuste debe realizarse manualmente por parte del personal de mantenimiento.

En cuanto a la climatización, actualmente no existe ningún sistema de calentamiento específico del agua. La temperatura de los vasos depende de las condiciones meteorológicas, de la radiación solar y de la inercia térmica del volumen almacenado. Esto implica que la piscina solo se encuentra en condiciones óptimas de baño durante los meses de verano, sin posibilidad de ampliar significativamente la temporada de uso.

El cuadro eléctrico del sistema es básico, limitado al control de bombas y programación horaria. Asimismo, el circuito cuenta con líneas de desagüe y purga para operaciones de vaciado parcial o total, necesarias en las labores de mantenimiento anual.

En la Ilustración 14 se representa de manera esquemática el funcionamiento del sistema de depuración actual, compuesto por el circuito de aspiración mediante skimmers y fondo, la impulsión hacia la bomba, el filtrado a través de un filtro de arena con válvula selectora y, finalmente, el retorno del agua limpia a la piscina por medio de boquillas de impulsión. Esta imagen permite visualizar de forma clara los elementos descritos en el texto anterior y facilita la comprensión del ciclo hidráulico básico que asegura la calidad del agua en las piscinas de la urbanización.

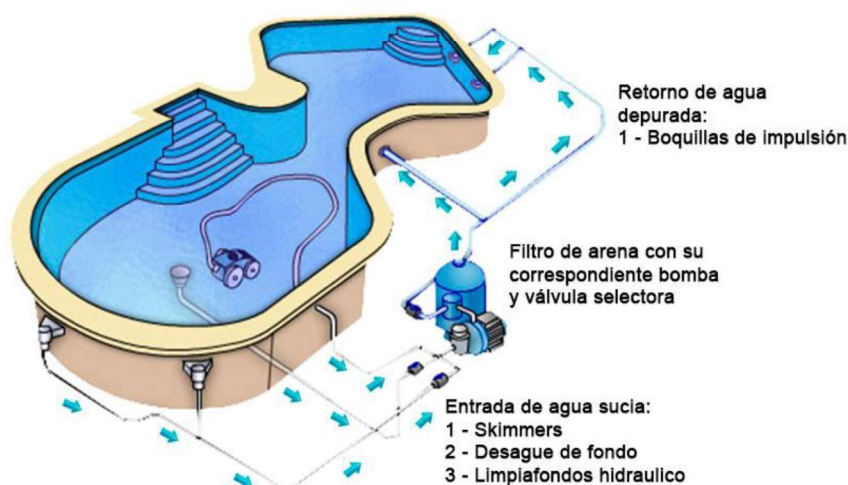


Ilustración 14: Esquema representativo piscina comunitaria. Fuente: Grupo Nice Pool (26)

5.2. Propuestas de mejora energética en la piscina

5.2.1. Instalación de cubiertas térmicas flotantes

Explicación técnica

Las cubiertas térmicas flotantes son una de las soluciones más eficaces y asequibles para reducir las pérdidas energéticas en piscinas comunitarias. Se fabrican normalmente en polietileno con burbujas o espuma aislante, y se colocan sobre la superficie del agua cuando la piscina no está en uso.

En la Ilustración 15 se representa de manera esquemática la diferencia entre una cubierta de burbujas tradicional y una cubierta reforzada. Mientras que la primera presenta puntos débiles en las zonas expuestas a los rayos ultravioleta y al ataque químico, la segunda incorpora un refuerzo de hasta un 50 % de espesor adicional en las zonas críticas, lo que incrementa su resistencia y prolonga su vida útil. Este tipo de soluciones técnicas son especialmente relevantes en piscinas comunitarias, donde la elevada frecuencia de uso y la exposición continuada al sol y a agentes químicos exigen materiales de mayor durabilidad.



Ilustración 15: Esquema comparativo entre cubierta tradicional y cubierta reforzada. Fuente: Poolplus (27)

Su principal función es reducir la evaporación del agua, que representa hasta el 70 % de las pérdidas de energía térmica en una piscina al aire libre. Además, limitan el enfriamiento nocturno, reducen la pérdida de cloro y otros productos químicos, y ayudan a mantener el agua más limpia. (28)

El uso de cubiertas permite reducir hasta un 50 % las pérdidas energéticas y mantener la temperatura del agua 3–4 °C más alta respecto a una piscina sin cubierta. (29)

En una instalación como la de la urbanización (240 m² de superficie total entre piscina principal y piscina infantil), la cubierta reduciría de manera notable la necesidad de aporte energético para climatización (si se aplica en fases posteriores) y, aunque no se utilice un sistema de calefacción, prolongaría el confort de baño durante parte de la temporada.

Ahorro económico y energético

Para la estimación de las pérdidas energéticas por evaporación de la piscina se ha considerado un escenario de uso realista, en el que el vaso permanece descubierto

durante aproximadamente 16 horas al día a lo largo de la temporada de baño. Se ha adoptado una duración de la temporada de 120 días al año, valor representativo para una comunidad residencial en la Comunidad de Madrid.

El caudal de evaporación se ha calculado considerando una tasa media de 0,12 kg de agua evaporada por metro cuadrado y hora para piscinas descubiertas en condiciones de verano. Este valor, recogido en distintas fuentes técnicas y guías de eficiencia energética en piscinas, refleja las pérdidas típicas por evaporación debidas a la acción combinada del viento, la radiación solar y la diferencia de temperatura entre el agua y el aire.

En cuanto al efecto de la cubierta, se ha supuesto una reducción del 50 % de las pérdidas por evaporación al utilizar una lona térmica. Finalmente, para la conversión de masa evaporada a energía, se ha adoptado un valor de calor latente de vaporización de 2,43 MJ/kg, correspondiente a las condiciones de temperatura de operación del agua en piscina (20–30 °C). Este parámetro representa la energía necesaria para que el agua cambie de fase de líquido a vapor, y constituye la base para la cuantificación del ahorro energético atribuible a la cubierta térmica.

Una vez recopilados los datos de partida, se procede a calcular las pérdidas térmicas por evaporación sin la cubierta.

$$\begin{aligned}\dot{M} &= 0,12 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{h}} \cdot 240 \text{ m}^2 = 28,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\ \dot{Q}_{\text{evap}} &= 28,8 \cdot 2,43 = 69,98 \text{ MJ/h} \approx 19,44 \text{ kW} \\ E_{\text{evap}} &= 19,44 \text{ kW} \cdot \frac{12 \text{ h}}{\text{día}} \cdot 120 \text{ d} \approx 28 \text{ MWhth}\end{aligned}$$

Ecuación 20: Pérdida térmica por evaporación

El resultado obtenido pone de manifiesto la magnitud de las pérdidas energéticas por evaporación en piscinas descubiertas, que en este caso alcanzan los 28 MWh térmicos por temporada. Este valor explica por qué la evaporación se considera el principal foco de ineficiencia en este tipo de instalaciones.

Como se ha mencionado anteriormente, la reducción de las pérdidas con esta cubierta es aproximadamente un 50%. Por lo tanto, el ahorro queda reflejado en la Ecuación 21 cuando la lámina está cubierta (16 horas).

$$E_{\text{ahorro}} = 28 \cdot \frac{16}{24} \cdot 0,5 = 9,3 \text{ MWhth/año}$$

Ecuación 21: Ahorro con cubierta

Suponiendo que el rendimiento es prácticamente 100% (1 MWhth = 1 MWeh) y con un precio de electricidad de 0,135 €/kWh, el ahorro económico es de 1255€ por temporada.

Una vez calculado el ahorro, se calcula la inversión de cara a calcular el periodo de retorno de las cubiertas.

El modelo de cubierta elegido es el GeoBubble EnergyGuard (Negra) 500 micras con el precio de ambas cubiertas reflejado en la Ilustración 16. Este precio se ha calculado en base a las dimensiones de la piscina.

Producto	Precio	Cantidad	Total
 Manta térmica GeoBubble EnergyGuard Selective Transmission Negra de 500-800 Micras Configuración: A medida Forma de su piscina: Rectangular Medidas: Largo: 20m, Ancho: 10m Modelo: GeoBubble EnergyGuard (Negra) 500 micras Refuerzo: Sin refuerzo Enrollador: No Esquinas: No Flotador de avance: No	2.057,00 €	1	2.057,00 €
 Manta térmica GeoBubble EnergyGuard Selective Transmission Negra de 500-800 Micras Configuración: A medida Forma de su piscina: Rectangular Medidas: Largo: 10m, Ancho: 4m Modelo: GeoBubble EnergyGuard (Negra) 500 micras Refuerzo: Sin refuerzo Enrollador: No Funda Reflectante: No Esquinas: No Flotador de avance: No	411,40 €	1	411,40 €

Ilustración 16: Precio cubiertas térmicas. Fuente: Swimhome (30)

El CAPEX por lo tanto es de 2468,4 €. Respecto a los gastos de personal, se consideran nulos al llevarse a cabo esta actividad por el socorrista.

Por lo tanto, el periodo de retorno se refleja en la Ecuación 22.

$$\text{Payback} = \frac{2468,4}{1255} = 1,96 \text{ años}$$

Ecuación 22: Periodo de retorno cubierta térmica

En la Ilustración 17 se observa de una manera más visual el periodo de retorno. A su vez, se estima que en 5 años se tenga un balance económico de aproximadamente 4000€.

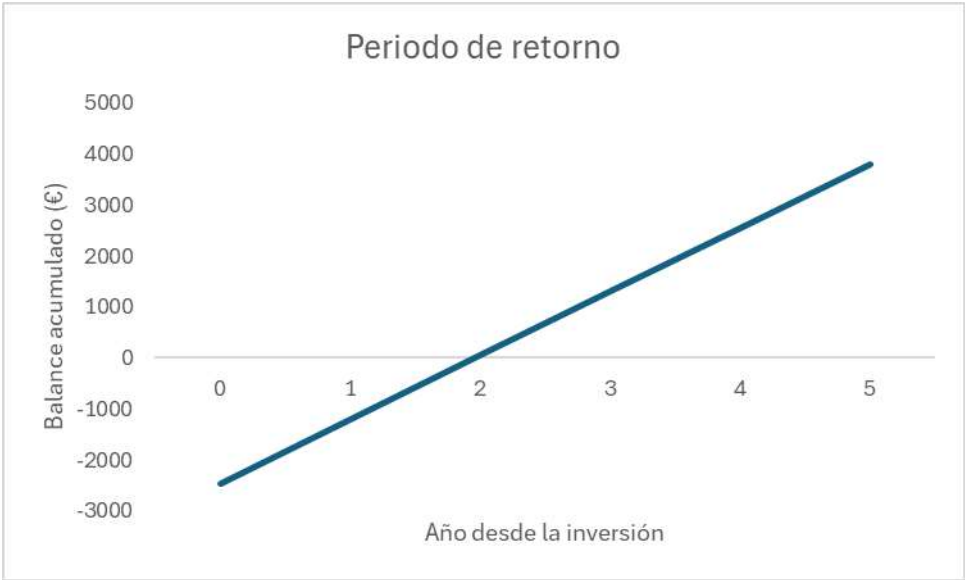


Ilustración 17: Periodo de retorno cubierta térmica. Fuente: Elaboración propia

El análisis económico de la medida confirma que la cubierta térmica constituye una de las inversiones más rentables dentro de las opciones de optimización energética de la urbanización. Con un periodo de retorno simple en torno a 2 años, la amortización se alcanza en apenas dos temporadas de uso, muy por debajo de la vida útil esperada del sistema (entre 4 y 6 años en modelos de gama media-alta). Esto implica que, durante más de la mitad de su ciclo de vida, la cubierta generará ahorros netos tanto en consumo eléctrico como en productos químicos, reduciendo de forma directa los costes de operación y mejorando la sostenibilidad del servicio. En consecuencia, se trata de una medida de rápido retorno, bajo riesgo y elevada eficiencia económica, fácilmente justificable en un plan de mejoras energéticas integrales.

5.2.2. Sustitución de bombas de recirculación por equipos de velocidad variable

Situación actual en la urbanización

En la piscina comunitaria objeto del presente estudio, el sistema de recirculación del agua está compuesto por dos bombas centrífugas de velocidad fija instaladas en la sala técnica. Según la información facilitada por la comunidad, las bombas tienen las siguientes características:

- Bomba principal (vasos adultos, 20 × 10 m, 400 m³): 4,0 kW, caudal de diseño 75 m³/h.
- Bomba secundaria (vaso infantil, 10 × 4 m, 16 m³): 1,5 kW, caudal de diseño 5 m³/h.

El funcionamiento actual es continuo durante la temporada de apertura (aprox. 16 h/día durante 120 días, es decir, 1.920 h/año). El sistema carece de variador de frecuencia, por lo que ambas bombas trabajan siempre a velocidad nominal, independientemente de la carga de bañistas o de la calidad del agua.

Esto provoca que, incluso en horarios de baja afluencia (por la mañana temprano o a última hora de la tarde), el sistema consuma prácticamente la misma energía que en los picos de uso.

Consumo energético actual

El consumo se ha estimado considerando el funcionamiento simultáneo de las dos bombas:

$$E = (P_{\text{adultos}} + P_{\text{infantil}}) \cdot h_{\text{anuales}}$$

$$E = (4 \text{ kW} + 1,5 \text{ kW}) \cdot 1.920 \text{ h}$$

$$E \approx 10.650 \text{ kWh/año}$$

Ecuación 23: Consumo energético piscina

Este consumo supone un coste eléctrico de:

$$C = 10.560 \text{ kWh} \cdot 0,135\text{€/kWh} \approx 1.425 \text{ €/año}$$

Propuesta de mejora: bombas de velocidad variable

Se propone la sustitución de las dos bombas existentes por modelos equivalentes en caudal, pero con variador de frecuencia integrado, que permiten modular la velocidad en función de la calidad del agua y del horario de uso.

- Nueva bomba vaso adultos: 4,0 kW VSD, rango de caudal 40–75 m³/h.
- Nueva bomba vaso infantil: 1,5 kW VSD, rango de caudal 3–5 m³/h.

El control automático ajustará la velocidad de giro en tres modos operativos:

1. Modo estándar (50 % del día): bomba al 70 % de velocidad nominal.
2. Modo punta (30 % del día, horas de baño): bomba al 100 %.
3. Modo valle (20 % del día): bomba al 50 %.

Consumo energético con bombas VSD

Para el cálculo se aplica la ley del cubo de afinidad (la potencia es proporcional al cubo de la velocidad relativa):

$$P_{\text{rel}} = \left(\frac{n}{n_0} \right)^3$$

Ecuación 25: Ley del cubo de afinidad

- A 100 % → 100 % de potencia.
- A 70 % → 34 % de potencia.
- A 50 % → 12,5 % de potencia.

La potencia media para la bomba de la piscina grande es la siguiente:

$$P_{\text{media}} = 0,5 \cdot 0,34 \cdot 4 + 0,3 \cdot 1 \times 4 + 0,2 \cdot 0,125 \cdot 4$$

$$P_{\text{media}} = 0,68 + 1,2 + 0,1 = 1,98 \text{ kW}$$

Ecuación 26: Potencia media piscina grande

La potencia media para la bomba de la piscina pequeña es la siguiente:

$$P_{\text{media}} = 0,5 \cdot 0,34 \cdot 1,5 + 0,3 \cdot 1 \times 1,5 + 0,2 \cdot 0,125 \cdot 1,5$$

$$P_{\text{media}} = 0,26 + 0,45 + 0,04 = 0,75 \text{ kW}$$

Ecuación 27: Potencia media piscina pequeña

El consumo total con las bombas VSD:

$$E_{\text{VSD}} = (1,98 + 0,75) \cdot 1.920 \approx 5242 \text{ kWh/año}$$

Ecuación 28: Consumo energético piscina con bombas VSD

$$C_{VSD} = 5242 \cdot 0,135 \approx 708 \text{ €/año}$$

Ecuación 29: Coste eléctrico piscina con bombas VSD

El ahorro económico, por lo tanto, es el siguiente:

$$\text{Ahorro}_{\text{€}} = 1.425 - 708 \approx 717 \text{ €/año}$$

Ecuación 30: Ahorro piscina con bombas VSD

Propuesta de renovación de bombeo en la piscina comunitaria

Se han adoptado los siguientes criterios de diseño:

- Piscina principal (20×10 m, $V \approx 400 \text{ m}^3$): tiempo de recirculación de referencia 5–8 h → caudal objetivo 80–50 m^3/h .
- Piscina infantil (10×4 m, $V \approx 16 \text{ m}^3$): tiempo de recirculación de referencia 4 h → caudal objetivo $\approx 4 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Altura manométrica de diseño: 10–12 metros de columna de agua, considerando pérdidas en filtro, válvula selectora, tuberías y accesorios de impulsión/retorno.
- Estrategia de control: bombas con variador de frecuencia (VSD) para ajustar velocidad a demanda real, reduciendo consumo eléctrico.

Tras analizar las curvas de caudal/presión de la gama Magnus VSD (31), se propone:

Vaso	Modelo propuesto	Potencia nominal	Caudal útil estimado	Comentarios
Piscina principal (400 m^3)	Magnus VSD 5 CV	5 CV	50–60 m^3/h	Cubre bien 6 h. Para objetivo 5 h, habilitar apoyo puntual con la bomba de 2,5 CV a baja velocidad para alcanzar 60–70 m^3/h en horas punta.
Piscina infantil (16 m^3)	Magnus VSD 2,5 CV	2,5 CV	18–25 m^3/h	Gran margen; operar a baja velocidad (30–40 %), lo que reduce drásticamente el consumo. Puede apoyar al vaso grande en puntas

Tabla 5: Selección de equipos bombas VSD

El caudal requerido se ha fijado por tiempos de recirculación habituales en piscina comunitaria, resultando 50–75 m^3/h para el vaso principal y 3–4 m^3/h para el infantil (16 m^3). Para la altura manométrica, se adopta un valor de proyecto ≈ 10 –12 m.c.a., coherente con: pérdidas en filtro de arena, válvula selectora, red de tuberías y accesorios y elementos locales. En estas condiciones, una bomba VSD de 5 CV entrega típicamente 50–60 m^3/h , suficiente para 6 h; si el objetivo operativo es reducir a 4–5 h en jornadas de alta ocupación, se prevé un modo “assist” en el que la 2,5 CV aporta ≈ 10 –12 m^3/h adicionales trabajando al 50 % de velocidad, aprovechando la ley cúbica de potencia: reducciones de rpm suponen caídas significativas de kW. Esta estrategia minimiza el CAPEX, aporta redundancia y permite operar a bajas rpm la mayor parte del tiempo, reduciendo ruido, cavitación y desgaste.

En el vaso infantil, la 2,5 CV queda deliberadamente sobredimensionada para permitir apoyo ocasional al vaso principal; en operación normal se configurará a caudales muy bajos ($\approx 4\text{--}6 \text{ m}^3/\text{h}$), con VSD ajustando caudal y horarios. Se recomienda, además, coordinar los ciclos de filtración con tarifa eléctrica y ocupación para bajar horas a plena carga y consolidar el ahorro. Finalmente, el punto de trabajo definitivo se verificará con curvas del fabricante y pérdidas de carga reales (ensayo de presión y medición de Δp en filtro), ajustando la curva de velocidad del VSD para mantener calidad de agua con el mínimo consumo.

Estimación de inversión (CAPEX)

En la Ilustración 18 se muestran los modelos de bombas de velocidad variable Magnus-4 con distintas potencias disponibles en el mercado, junto con su precio de adquisición. Para el presente estudio se han seleccionado la VSD Magnus-4 de 2,5 CV (1.499 €) destinada al vaso infantil, y la VSD Magnus-4 de 5 CV (2.190 €) para el vaso principal, al ser las que mejor se ajustan a las necesidades de caudal calculadas previamente. La diferencia de precios respecto a modelos intermedios (3–4 CV) no resulta significativa, pero la elección de potencias extremas (2,5 y 5 CV) aporta un mayor rango de flexibilidad operativa, garantizando tanto un funcionamiento eficiente a baja carga como la capacidad de cubrir picos de demanda cuando sea necesario.

PRECIOS

	Bomba VSD Magnus-4 250 de 2.5 CV	1.499,00 €	☐
	Bomba VSD Magnus-4 300 de 3 CV	1.899,00 €	☐
	Bomba VSD Magnus-4 400 de 4 CV	1.959,00 €	☐
	Bomba VSD Magnus-4 550 de 5 CV	2.190,00 €	☐

Ilustración 18: Bombas de velocidad variable Magnus-4 disponibles en el mercado. Fuente: OP (32)

La suma del equipo de bombeo es de 3.689 €. A la inversión en bombas debe añadirse el coste asociado a la instalación, que incluye tanto la mano de obra especializada como los materiales auxiliares. En este caso, se estima que la intervención requerirá dos técnicos durante una jornada completa, con un coste aproximado de 600 €. Asimismo, será necesario incorporar accesorios hidráulicos específicos (uniones, válvulas, piezas de PVC y elementos de adaptación), cuyo importe se sitúa en torno a 600 €, dependiendo del grado de compatibilidad de las nuevas bombas con la

instalación existente. De este modo, el presupuesto total de la actuación no solo contempla el suministro de los equipos principales, sino también los gastos adicionales imprescindibles para garantizar su correcta integración y funcionamiento en la sala técnica de la urbanización.

$$\text{CAPEX} = 3.689\text{€} + 600\text{€} + 600\text{€} = 4889\text{€}$$

Ecuación 31: CAPEX bombas VSD

Con la inversión total estimada de 4.889 € y un ahorro anual asociado de 717 €, se puede calcular el periodo de retorno.

$$\text{Payback} = \frac{4.889}{717} = 6,82$$

Ecuación 32: Payback bombas VSD

Este resultado significa que, transcurrido ese tiempo, la inversión quedará totalmente amortizada gracias a los ahorros energéticos obtenidos por la sustitución de las bombas de recirculación por modelos de velocidad variable. A partir de ese momento, el sistema comenzará a generar beneficios netos en forma de reducción de costes eléctricos para la comunidad. Además, debe destacarse que el periodo de retorno calculado no considera otros beneficios indirectos, como la mayor durabilidad de los equipos por trabajar en rangos de menor exigencia o la mejora en la calidad de la filtración, lo que refuerza todavía más la conveniencia de la medida.

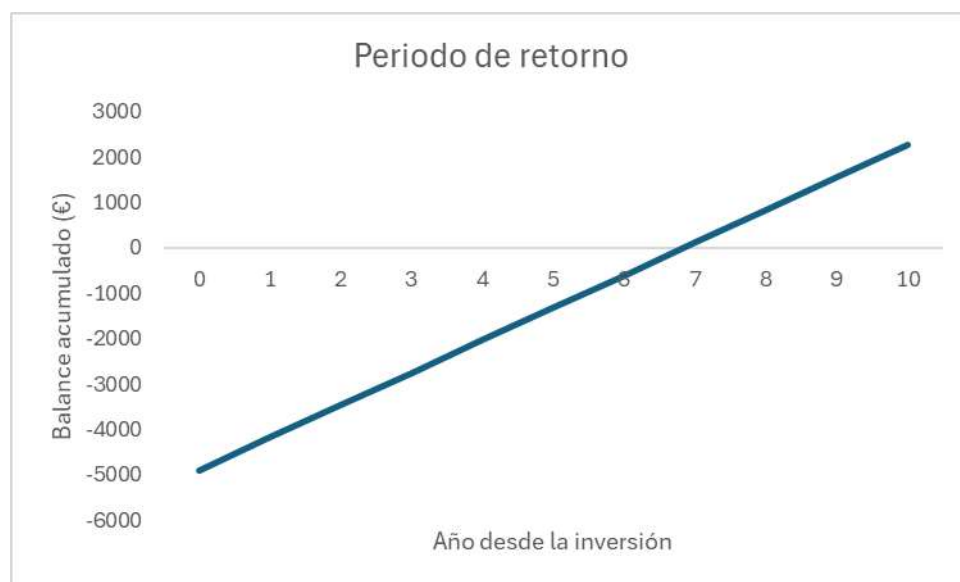


Ilustración 19: Periodo de retorno bombas VSD

De manera más visual, en la Ilustración 19 se representa la evolución del balance acumulado de la inversión a lo largo de los años. Se observa cómo, partiendo de un valor negativo de -4.889 € en el momento de la instalación, la pendiente positiva asociada a los ahorros anuales de 717 € permite alcanzar el punto de equilibrio alrededor del año 7, momento en el que la inversión queda totalmente amortizada. A

partir de ahí, el sistema comienza a generar beneficios netos para la comunidad. En el horizonte de 10 años, el balance acumulado se sitúa en torno a 2.300 €, lo que demuestra la rentabilidad y conveniencia de la medida.

5.3. Conclusiones parciales piscina comunitaria

El análisis realizado muestra que la instalación de una cubierta térmica representa la medida de mayor rentabilidad inmediata, con un periodo de retorno cercano a las dos temporadas y un ahorro energético significativo gracias a la reducción de pérdidas por evaporación y del consumo de productos químicos. Su principal limitación es la vida útil relativamente corta (en torno a 5–6 años), lo que implica la necesidad de reposición periódica para mantener los beneficios.

Por otro lado, la sustitución de las bombas existentes por equipos de velocidad variable (VSD) supone una inversión más elevada y con un periodo de retorno más largo, pero ofrece ventajas estructurales importantes: reducción del consumo eléctrico, mayor eficiencia en la circulación del agua, menor nivel sonoro y una vida útil superior (10–12 años con mantenimiento adecuado).

Ambas estrategias resultan, por tanto, complementarias. La cubierta térmica asegura un impacto económico y energético rápido en el corto plazo, mientras que las bombas VSD refuerzan la eficiencia hidráulica y operativa a medio y largo plazo. La combinación de ambas soluciones proporciona un equilibrio óptimo entre ahorro inmediato y sostenibilidad técnica de la instalación en el tiempo.

6. Optimización del consumo de agua en la urbanización

6.1. Sistema actual y consumos

El suministro de agua de la urbanización está gestionado por la empresa de servicios energéticos Remica, encargada tanto de la contabilización individualizada de consumos como del reparto de costes comunitarios. El sistema actual distingue entre dos conceptos principales: agua fría de red (AF) y agua caliente sanitaria (ACS), esta última generada de forma centralizada a partir de calderas comunitarias, cuyo consumo energético también se repercute a los vecinos.

La factura comunitaria analizada (enero 2025) refleja un gasto total de 6.163,44 € en el periodo de liquidación, repartidos en:

- Consumo de energía para ACS: 4.462,18 €
- Consumo de agua fría: 1.701,26 €

En términos de volumen, el periodo refleja consumos de:

- ACS: 802,98 m³ → coste unitario: 5,557 €/m³
- Agua fría: 1.330,15 m³ → coste unitario: 1,279 €/m³

Es decir, aunque el volumen de agua fría es claramente superior, el coste asociado al ACS representa cerca del 72 % del gasto total, debido al elevado coste energético de su producción.

El consumo medio de la comunidad en el periodo de facturación analizado (diciembre 2024 – enero 2025) asciende a 2.133,1 m³ entre agua fría y ACS. Dado que esta cifra corresponde a un intervalo de aproximadamente dos meses (62 días exactos, según la factura), es posible extrapolar el consumo anual aplicando un factor de proporcionalidad. Concretamente, el número de periodos equivalentes en un año completo sería $365/62 \approx 5,9$ periodos, lo que permite estimar que el volumen anual total se sitúa en torno a:

$$2.133,1 \text{ m}^3 \cdot 5,9 \approx 12.500 - 12.600 \text{ m}^3/\text{año}$$

Ecuación 33: Volumen anual total

Este valor incluye tanto el agua fría de red como el agua caliente sanitaria, y constituye una aproximación razonable al consumo real de la comunidad en condiciones normales de operación, siendo 7.800 m³/año el consumo de agua fría y 4.700 m³/año el consumo de agua caliente.

En términos económicos, al multiplicar estos volúmenes extrapolados por los precios unitarios obtenidos de la liquidación (1,279 €/m³ para agua fría y 5,557 €/m³ para ACS), se obtiene un coste anual estimado en el rango de 36.000 €. De este importe, 26.130 € corresponden al ACS, lo que representa más de dos tercios del gasto total a pesar de que su volumen de consumo es bastante menor que el del agua fría, que tiene un coste de 9.970 €. Este hecho pone de manifiesto que el verdadero peso económico no reside

tanto en la cantidad de agua consumida como en la energía necesaria para calentarla y mantener el sistema de recirculación en funcionamiento continuo.

En definitiva, la extrapolación de los consumos mensuales a escala anual confirma que el agua caliente sanitaria es el principal vector de coste en la partida de agua de la comunidad, lo que justifica que las medidas de mejora deban orientarse en primer lugar hacia la optimización de este servicio (reducción de pérdidas térmicas, mejora en la generación, incorporación de energías renovables, etc.).

La liquidación individual de viviendas confirma esta tendencia. Un usuario tipo, en el mismo periodo de facturación, presenta consumos de:

- Agua fría: 29,01 m³ → coste 37,10 €
- Agua caliente sanitaria: 16,89 m³ → coste 93,86 €

Lo que implica que, en términos unitarios, el ACS es 3,5 veces más caro que el agua fría. Este diferencial refleja la ineficiencia actual del sistema de generación y distribución de ACS, donde además se producen pérdidas térmicas por tuberías largas, baja eficiencia de equipos y recirculaciones continuas sin regulación horaria.

Del análisis del sistema actual pueden extraerse tres conclusiones clave:

1. El ACS concentra el mayor peso económico del consumo de agua (≈72 % del gasto total), a pesar de ser el 35 % del volumen consumido.
2. Los costes energéticos asociados al ACS son muy elevados, lo que abre una oportunidad clara de mejora mediante medidas de eficiencia.
3. No existen sistemas de monitorización avanzada o telelectura en tiempo real, lo que dificulta la detección de fugas y limita la concienciación de los usuarios.

6.2. Propuestas de mejora en la gestión del agua

6.2.1. Instalación de reductores de caudal en grifería y duchas

6.2.1.1. Descripción de la medida y fundamento

Los reductores de caudal son insertos que se colocan en grifos o duchas para disminuir el flujo sin empeorar la sensación de confort, ya que mezclan aire con el agua o estrangulan el paso de forma controlada. Ensayos divulgados por OCU indican ahorros >50 % con estos dispositivos; además, existen kits comerciales que permiten fijar el caudal objetivo en 4/6/9 L·min⁻¹ (en vez de los 12–15 L·min⁻¹ típicos), con anuncios de hasta 70 % de reducción en ducha, dependiendo del regulador que se elija. (33)

La aplicación idónea en la comunidad es en las duchas de viviendas (uso frecuente y volúmenes elevados).

La hipótesis de cálculo para el caso de estudio es la siguiente:

- Viviendas: 96
- Duchas por vivienda: 3

- Duración media de cada ducha: 5 min
- Caudal actual: $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (ducha convencional)
- Reductor objetivo: -50% ($\approx 7,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)
- Precio ACS (factura): $5,557 \text{ €/m}^3$
- Precio AF (factura): $1,279 \text{ €/m}^3$

6.2.1.2. Cálculo del consumo y del ahorro

La situación actual (sin reductores) es la siguiente:

- Volumen por ducha = $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \times 5 \text{ min} = 75 \text{ L}$
- Volumen diario por vivienda (3 duchas) = 225 L/día
- Volumen diario comunidad = $96 \times 225 \text{ L} = 21.600 \text{ L} \approx 21,6 \text{ m}^3/\text{día}$
- Volumen anual = $21,6 \times 365 = 7.884 \text{ m}^3/\text{año}$

La situación con reductores, disminuyendo a la mitad el caudal sería la siguiente:

- Volumen por ducha = $7,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \times 5 \text{ min} = 37,5 \text{ L}$
- Volumen diario por vivienda = $112,5 \text{ L/día}$
- Volumen diario comunidad = $10,8 \text{ m}^3/\text{día}$
- Volumen anual reducido = $3.942 \text{ m}^3/\text{año}$

Restando ambos volúmenes, se obtiene el ahorro volumétrico con esta nueva medida.

- Ahorro = $7.884 - 3.942 = 3.942 \text{ m}^3/\text{año}$

La estimación es lineal con el número de duchas y su duración. Si en verano aumentan los usos, la magnitud anual cambia, pero el porcentaje de ahorro se mantiene muy cercano al 50 % mientras el tiempo de ducha no cambie. Por eso el reductor es una medida robusta: su rendimiento no depende de la época del año, sino del caudal fijado.

Qué significa para la operación de la comunidad. En términos de explotación, un ahorro de $3.942 \text{ m}^3/\text{año}$ equivale aproximadamente a $10\text{--}11 \text{ m}^3/\text{día}$ menos de circulación en la red interior. Eso reduce simultáneamente el agua captada y facturada, los volúmenes de ACS a calentar y recircular y las pérdidas térmicas en distribución. Por tanto, además del ahorro directo en €/m³, habrá menos kWh térmicos en calderas/bombas de calor y menos horas efectivas en bombas de recirculación.

6.2.1.3. Traducción económica

La fracción de agua caliente empleada en la mezcla de una ducha no se distribuye de manera equitativa entre agua fría y caliente, sino que tiende a estar dominada por la primera. Según el análisis realizado por el Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) en el marco del programa WaterSense de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., basado en el estándar ANSI 301-2019 y en datos empíricos del Residential Energy Consumption Survey (RECS 2015), se estima que aproximadamente un 67,8 %

del caudal corresponde a agua caliente, mientras que el resto proviene de la red de agua fría. Esta estimación, ampliamente utilizada en cálculos de eficiencia hídrica y energética en edificios, resulta en especial relevante para dimensionar correctamente las instalaciones de ACS (agua caliente sanitaria) y evaluar su impacto energético en el consumo doméstico. (34)

Table 7: Hot Water Percentage by End Use from ANSI 301-2019 and RECS 2015 Data

End use	Percent of total residential hot water use (%)	Percent of end use hot water
Showers	34.8	67.8
Lavatory faucets	16.5	60.7

Ilustración 20: Porcentaje de agua caliente en las duchas. Fuente: (34)

De esta forma, para transformar el ahorro volumétrico anual obtenido ($\Delta V = 3.942 \text{ m}^3/\text{año}$) a términos económicos, se descompone ese volumen en ACS y AF según la fracción de mezcla mencionada anteriormente.

- Fracción caliente (ACS): 67,8 %

$$\Delta V_{\text{ACS}} = 0,678 \cdot 3.942 \approx 2.672,68 \text{ m}^3/\text{año}$$

Ecuación 34: Ahorro volumétrico agua caliente

- Fracción fría (AF): 32,2 %

$$\Delta V_{\text{AF}} = 0,322 \cdot 3.942 \approx 1.269,32 \text{ m}^3/\text{año}$$

Ecuación 35: Ahorro volumétrico agua fría

Con los precios unitarios obtenidos de la liquidación (ACS = 5,557 €/m³; AF = 1,279 €/m³), el ahorro económico anual queda:

$$\text{Ahorro (€)} = \Delta V_{\text{ACS}} \cdot 5,557 + \Delta V_{\text{AF}} \cdot 1,279$$

$$\text{Ahorro (€)} \approx 16.475,53 \text{ €/año}$$

Ecuación 36: Ahorro económico anual reductores caudal

El 90 % del ahorro monetario procede del ACS ($\approx 14.852 \text{ €}$) y solo un 10 % del agua fría ($\approx 1.623 \text{ €}$). Esto confirma que, más allá del volumen, el coste está dominado por la energía de calentamiento; por eso los reductores en ducha (principal punto de uso de ACS) son tan efectivos económicamente.

La lectura por vivienda es la siguiente:

- Volumen total ahorrado por vivienda: $3.942 / 96 \approx 41,06 \text{ m}^3/\text{año}$.
- Desglose por vivienda: $27,84 \text{ m}^3/\text{año}$ (ACS) y $13,22 \text{ m}^3/\text{año}$ (AF).
- Ahorro económico por vivienda: $16.475,53 / 96 \approx 171,62 \text{ €/año}$ ($\approx 14,30 \text{ €/mes}$ por vivienda solo por poner reductores en duchas).

6.2.1.4. Periodo de retorno

Las unidades para instalar son:

- 96 viviendas × 3 duchas = 288 reductores.

El precio de mercado de reductores/limitadores con tres insertos 4/6/9 L·min⁻¹ es de 8,99 €/ud.



Ilustración 21: Precio de mercado reductor de caudal. Fuente: (35)

El CAPEX total de los reductores de caudal es de 2.589,12€.

Una vez calculado el CAPEX y teniendo en cuenta que el gasto por mantenimiento es nulo al ser un roscado sencillo, se procede a calcular el periodo de retorno.

$$\text{Payback} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{2.589,12}{16.475,53} \approx 0,16 \text{ años} \approx 2 \text{ meses}$$

Ecuación 37: Periodo de retorno reductor de caudal

El resultado obtenido refleja que la medida presenta una extraordinaria rentabilidad, con un periodo de retorno simple inferior a los dos meses. Este comportamiento se explica porque el ahorro económico anual (≈16.476 €) es muy superior al desembolso inicial requerido (≈2.304 €), de manera que la medida se autofinancia en un plazo casi inmediato y comienza a generar beneficios netos desde el primer año de funcionamiento. Además, dado que la mayor parte del ahorro procede del agua caliente sanitaria (≈90 % del total), se produce una doble ventaja: reducción del consumo de agua y, sobre todo, reducción significativa de la energía necesaria para su calentamiento. Esto convierte la instalación de reductores de caudal en una de las actuaciones más efectivas y con mejor relación coste-beneficio dentro del conjunto de medidas propuestas en la comunidad.

En la Ilustración 22 se representa de forma visual la evolución del balance económico acumulado derivado de la instalación de reductores de caudal en grifería y duchas. Se observa cómo la inversión inicial, situada en torno a los 2.300 €, queda compensada en menos de dos meses, alcanzándose un punto de equilibrio prácticamente inmediato. A partir de ese momento, el ahorro generado se acumula de manera lineal, superando los 60.000 € al cabo de cuatro años. Este comportamiento pone de relieve no solo la viabilidad económica inmediata de la medida, sino también su capacidad para aportar un beneficio sostenido a medio plazo con un esfuerzo inversor mínimo.



Ilustración 22: Periodo de retorno reductor de caudal

6.2.1.5. Sensibilidad y escenarios

Una vez definido el escenario base con reductores de 7,5 L/min, resulta interesante analizar cómo variaría el impacto económico y energético si se optara por caudales diferentes en la grifería y duchas de la comunidad. En particular, se han estudiado tres escenarios adicionales: reductores de 9 L/min (más conservadores), de 6 L/min (intermedios) y de 4 L/min (máxima restricción de caudal). Esta comparativa permite evaluar la sensibilidad de los resultados frente a cambios en el nivel de restricción aplicado, y proporciona a la comunidad una visión más clara de las ventajas e inconvenientes de cada alternativa en términos de ahorro de agua, reducción de consumo energético y periodo de retorno de la inversión.

Esta comparativa se puede observar en la Tabla 6.

Caudal reductor (L/min)	Consumo anual (m³/año)	Ahorro volumen (m³/año)	Ahorro ACS (m³/año)	Ahorro AF (m³/año)	Ahorro (€/año)	Ahorro €/viv·año	Payback (meses)
9 (-40 %)	4.730,4	3.153,6	2.138,14	1.015,46	13.180 €	137,30 €	2,35
7,5 (-50%)	3.942,0	3.942,0	2.672,68	1.269,32	16.476 €	171,62 €	1,96
6 (-60 %)	3.153,6	4.730,4	3.207,21	1.523,19	19.771 €	205,94 €	1,57
4 (-73 %)	2.102,4	5.781,6	3.919,92	1.861,68	24.164 €	251,71 €	1,29

Tabla 6: Comparativa diferentes reductores

Cuanto menor es el caudal objetivo, mayor es el ahorro y más corto el periodo de retorno. No obstante, la práctica recomienda equilibrar confort y ahorro: 7,5–9 L/min suele funcionar bien en residencial; 6 L/min es viable si los residentes lo aceptan; 4 L/min es muy eficiente, pero puede resultar justo en algunas viviendas (se resuelve entregando insertos alternativos).

6.2.2. Reutilización de aguas grises para riego o cisternas

6.2.2.1. Introducción y contexto

Se denominan aguas grises a las aguas residuales de duchas, bañeras y lavabos (sin incluir inodoros ni cocina). Presentan una carga contaminante moderada y, tras un tratamiento físico-biológico y desinfección, pueden reutilizarse de forma segura en usos no potables como alimentación de cisternas de inodoros, riego de zonas verdes o limpieza. Esta práctica reduce el consumo de agua potable y el volumen vertido a saneamiento, avanzando hacia la economía circular en edificios residenciales. (36)

En España existe un marco regulatorio de reutilización del agua (RD 1085/2024) que impulsa el uso de agua regenerada y la sustitución de agua potable en determinados usos, complementado por documentación técnica y guías sectoriales. Aunque el RD se centra en agua regenerada a partir de depuración urbana, su enfoque ilustra la prioridad nacional por la reutilización, y las soluciones de edificio (aguas grises) se apoyan en guías técnicas y buenas prácticas del sector. Además, varias administraciones locales están promoviendo la reutilización en obra nueva, como los sistemas de reaprovechamiento de aguas de ducha para cisternas que Barcelona prevé hacer obligatorios en nuevos edificios. (37) (38)

Un punto clave para el potencial de ahorro es la estructura del consumo doméstico: en una vivienda tipo, ducha/baño $\approx$ 34 % y lavabo $\approx$ 18 % del consumo total. Es decir, más de la mitad ($\approx$ 52 %) del agua usada en el hogar tiene origen en aguas grises, lo que las convierte en el principal reservorio para reducir la demanda de agua potable si se reutilizan en usos no potables como cisternas ($\approx$ 21 % del consumo) y riego. (39)



Ilustración 23: Esquema de reutilización de aguas grises en edificios residenciales. Fuente: Ruberte (40)

La Ilustración 23 ilustra de manera esquemática el principio de funcionamiento de un sistema de reutilización de aguas grises en el ámbito residencial. Se observa cómo el agua procedente de duchas, lavabos y fregaderos de baño es conducida a un depósito donde se lleva a cabo su almacenamiento y tratamiento básico, con el fin de garantizar una calidad adecuada para usos no potables. A partir de este punto, el recurso regenerado se destina a aplicaciones de bajo riesgo sanitario, como la descarga de cisternas, el riego de jardines o la limpieza de exteriores. Esta representación gráfica refuerza la idea de que la reutilización constituye un ciclo sencillo y eficiente que permite cerrar el flujo de agua en el propio edificio, reduciendo tanto la demanda de agua de red como el volumen de vertido al alcantarillado.

6.2.2.2. Sistema actual en la urbanización

Actualmente, toda el agua consumida en la urbanización proviene de la red municipal, sin segregación de bajantes ni tratamiento específico de aguas grises. La facturación comunitaria evidencia un consumo anual del orden de $\approx 12.500 \text{ m}^3/\text{año}$ (suma de AF y ACS extrapolada a partir de facturas de referencia), con un peso económico elevado del ACS por su coste unitario superior (incluye energía de calentamiento y pérdidas de recirculación). Esta situación constituye una línea base adecuada para valorar el impacto de un sistema de reutilización de aguas grises a escala de comunidad.

Como premisa de proyecto, se asume que los descendentes de duchas y lavabos pueden sectorizarse para su captación independiente, condición necesaria para implantar un sistema de reutilización centralizado de acuerdo con las buenas prácticas del sector (red de captación independiente e inequívocamente identificada, habitualmente con color púrpura en la tubería para evitar cruces con residuales). (41)

6.2.2.3. Descripción técnica de la medida propuesta

La actuación consiste en implantar una instalación centralizada de aguas grises con las siguientes etapas:

1. Captación de aguas de duchas y lavabos mediante una red separativa (PP/PVC/PE) que conduce a la unidad de tratamiento. La red se señala como “no potable” y se separa físicamente de residuales y pluviales para evitar conexiones cruzadas.
2. Pretratamiento: tamizado/filtración para retener cabellos, fibras y sólidos finos, reduciendo obstrucciones y alargando la vida útil del sistema.
3. Tratamiento: combinación de filtración, bio-oxidación y desinfección (UV y/o cloración) en equipos compactos certificados para uso no potable (ej. recarga de WC).
4. Almacenamiento en depósito tamponado (gestiona picos y dota de autonomía), con instrumentación de nivel/alarma y bombeo a red no potable.
5. Distribución a consumos no potables:
 - Cisternas de inodoros de viviendas y zonas comunes (uso prioritario por estabilidad de demanda).
 - Riego de zonas ajardinadas.

Estas instalaciones incorporan monitorización (turbidez, conductividad, UV) y desinfección para garantizar la calidad del agua reutilizada en los puntos de uso no potable, conforme a especificaciones del fabricante y buenas prácticas del sector.



Ilustración 24: Esquema de tratamiento biológico de aguas grises. Fuente: Metertech (42)

La Ilustración 24 presenta un ejemplo esquemático de un sistema de reciclaje de aguas grises con tratamiento biológico. Se observa cómo las aguas procedentes de duchas, bañeras y lavabos son canalizadas hacia un reactor biológico, donde se produce una primera depuración mediante la acción de microorganismos. Posteriormente, el flujo pasa por una etapa de filtración, decantación y flotación que permite eliminar sólidos en suspensión y mejorar la calidad del agua. Tras la aplicación de un desinfectante, el recurso es almacenado en un depósito de aguas depuradas, desde el cual puede ser reutilizado para descargas de cisternas o para riego de jardines. Este esquema permite

visualizar de forma clara el recorrido del agua y las distintas barreras de tratamiento que garantizan un nivel de seguridad suficiente para su uso en aplicaciones no potables.

6.2.2.4. Estimación inicial del potencial de ahorro

Para dimensionar el impacto potencial sin disponer aún de planos/mediciones detalladas, se usa la descomposición del consumo doméstico por usos (referencias españolas). Tomando el consumo anual de la comunidad $\approx 12.500 \text{ m}^3/\text{año}$:

- Potencial bruto de aguas grises (duchas + lavabos) $\approx 52 \%$ del total

$$V_{\text{grises,bruto}} \approx 0,52 \cdot 12.500 = 6.500 \text{ m}^3/\text{año}$$

- Rendimiento de recuperación (pérdidas de captación, by-pass por mantenimiento, eficiencia del tren de tratamiento y disponibilidad frente a demanda): 60–70 % como rango de diseño inicial (43)

$$V_{\text{grises,aprovechable}} \approx (0,6 - 0,7) \cdot 6.500 = 3900 - 4550 \text{ m}^3/\text{año}$$

La cobertura de demandas no potables es la siguiente:

- Cisternas de inodoros representan 21 % del consumo total de vivienda, una demanda anual $\approx 2.625 \text{ m}^3/\text{año}$. Por tanto, el volumen aprovechable (3.9–4.55 mil $\text{m}^3/\text{año}$) cubriría 100 % de las cisternas y dejaría excedente para riego y/o limpieza viaria interna.
- Riego: con el excedente puede cubrirse la totalidad del riego anual (según superficie verde y pluviometría). La priorización operativa típica es WCs primero (demanda continua) y riego como uso secundario (estacional).

El dimensionado preliminar sugiere que un sistema centralizado permitiría abastecer totalmente las cisternas y reducir de forma significativa el agua de red empleada en riego.

6.2.2.5. Análisis económico

Con los datos anteriores, se estima volumen reutilizable de 3 900 a 4 550 $\text{m}^3/\text{año}$ de agua gris (captación de duchas y lavabos). Como estos volúmenes se utilizan en lugar de agua de red fría, el ahorro económico directo se calcula usando el precio de 1,279 €/m³:

- Ahorro anual mínimo: $3\,900 \text{ m}^3 \times 1,279 \text{ €/m}^3 = 4\,988 \text{ €/año}$
- Ahorro anual máximo: $4\,550 \text{ m}^3 \times 1,279 \text{ €/m}^3 = 5\,819 \text{ €/año}$

Por lo tanto, el ahorro esperado se sitúa entre 5.000 y 5.800 € anuales. Para los cálculos posteriores, se utiliza un valor intermedio aproximado de 5.500 €.

Para estimar la inversión, se recurre a estudios de coste per cápita: Domènech & Saurí (2010) indican un gasto medio de 516 € por vivienda para un sistema de reutilización

de aguas grises, lo que representaría una inversión total para la comunidad (96 viviendas) de 49.600€. (44)

$$\text{CAPEX} = 96 \cdot 516 = 49.600\text{€}$$

Ecuación 38: CAPEX sistema de reutilización de aguas grises

Con este CAPEX estimado, se procede a calcular el periodo de retorno simple:

$$\text{Payback} = \frac{49.600}{5.500} \approx 9 \text{ años}$$

Ecuación 39: Periodo de retorno sistema de reutilización de aguas grises

El sistema aporta una rentabilidad estructural robusta. Aunque el coste inicial es significativo, el ahorro acumulado se recupera en menos de una década. Además, se generan efectos positivos adicionales como la reducción de la presión sobre el alcantarillado, la infraestructura de abastecimiento y una notable mejora ambiental y de sostenibilidad del edificio. Este enfoque no solo aporta eficiencia hídrica y financiera, sino que también está alineado con normativas y políticas públicas.

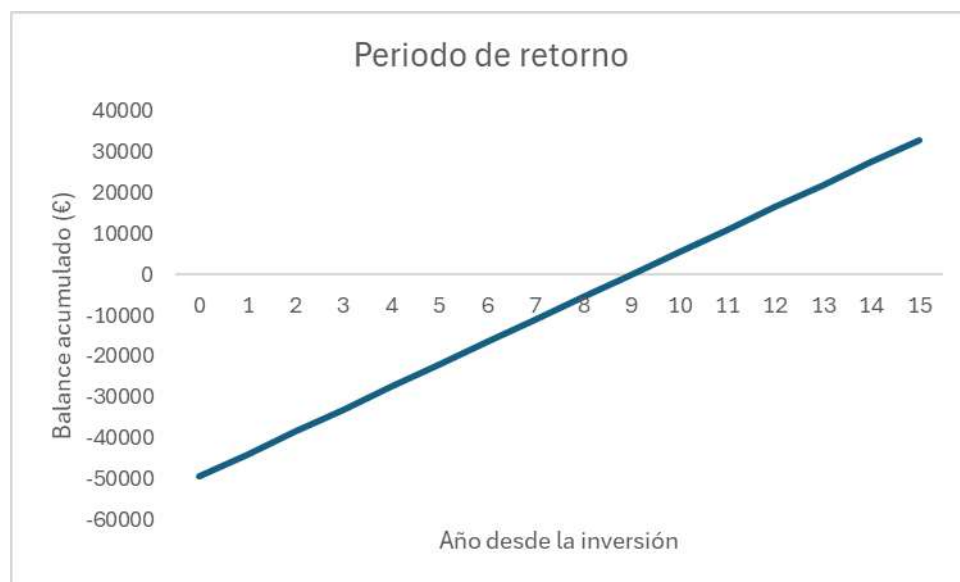


Ilustración 25: Periodo de retorno sistema de reutilización de aguas grises

La Ilustración 25 muestra de manera visual la evolución del balance económico acumulado asociado a la implantación del sistema de reutilización de aguas grises. Se observa cómo la inversión inicial, cercana a los 50.000 €, comienza a recuperarse progresivamente gracias al ahorro en consumo de agua potable, alcanzándose el punto de equilibrio en torno al año 8. A partir de este momento, el sistema no solo cubre su propio coste, sino que empieza a generar un beneficio neto para la comunidad, que al final de la vida útil analizada (15 años) se aproxima a los 30.000 € de saldo positivo acumulado. Considerando que la vida útil real de este tipo de instalaciones puede situarse entre 15 y 25 años, la rentabilidad queda plenamente garantizada, ya que el periodo de retorno se alcanza antes de la mitad de la vida esperada del sistema. Esto implica que, más allá de cubrir los costes, el proyecto asegura un flujo de ahorro neto

durante varios años, consolidándose como una de las medidas de mayor impacto económico y ambiental dentro del plan de eficiencia energética y de gestión sostenible del agua de la urbanización.

6.3. Impacto ambiental y contribución a la sostenibilidad

Más allá de la reducción de costes económicos, las medidas planteadas tienen un impacto ambiental directo y cuantificable.

En primer lugar, el ahorro de agua conseguido con los reductores de caudal y con el sistema de reutilización de aguas grises puede estimarse en más de 4.000–5.000 m³ anuales. Este volumen equivale aproximadamente al consumo medio anual de 30–40 hogares españoles. Dicho de otro modo, la comunidad estaría reduciendo su huella hídrica en una magnitud equiparable al abastecimiento completo de un pequeño vecindario.

En segundo lugar, la reducción del consumo de agua caliente sanitaria implica también un descenso proporcional en la demanda energética para su calentamiento, evitando así la emisión indirecta de gases de efecto invernadero asociados a la generación de electricidad. Suponiendo un ahorro de unos 30 MWh/año en energía térmica, y considerando un factor de emisión medio del sistema eléctrico español de 0,20 tCO₂/MWh, la reducción anual de emisiones se situaría en torno a 6 toneladas de CO₂ equivalente.

Por último, estas mejoras refuerzan el alineamiento de la comunidad con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), consolidando a la urbanización como un ejemplo de transición hacia un modelo de gestión más eficiente y respetuoso con los recursos naturales.

6.4. Conclusiones parciales consumo de agua

El análisis del sistema de consumos de agua en la comunidad ha permitido identificar que el mayor peso económico recae en la producción de agua caliente sanitaria, que concentra más de dos tercios del gasto total pese a representar poco más de un tercio del volumen consumido. Esta realidad ha guiado la propuesta de medidas correctoras orientadas tanto a la reducción del consumo en puntos de uso (instalación de reductores de caudal en duchas) como a la optimización de la fuente de suministro (implantación de un sistema centralizado de reutilización de aguas grises).

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que las dos líneas de actuación son altamente efectivas y complementarias: por un lado, los reductores de caudal constituyen una medida de muy bajo coste y con un periodo de retorno prácticamente inmediato, que reduce de forma simultánea el consumo de agua y la energía asociada a su calentamiento. Por otro lado, la reutilización de aguas grises, aun requiriendo una inversión inicial significativa, asegura una reducción estructural del consumo de agua potable con una rentabilidad garantizada a lo largo de la vida útil de la instalación.

En conjunto, estas medidas suponen no solo un ahorro económico considerable para la comunidad, sino también un avance en sostenibilidad y resiliencia hídrica, alineado con las políticas públicas y con los objetivos de eficiencia energética y ambiental a escala urbana.

7. Optimización energética y sostenibilidad en garajes comunitarios

7.1. Contexto actual

La urbanización objeto de estudio dispone de dos zonas de aparcamiento subterráneo con un total de 127 plazas de garaje. El primer garaje cuenta con dos plantas (40 plazas en la planta -1 y 42 en la planta -2), mientras que el segundo garaje dispone de una sola planta con 45 plazas adicionales. Se trata de instalaciones construidas hace varias décadas, que mantienen una configuración técnica básica y sin apenas renovaciones significativas en cuanto a eficiencia energética o sostenibilidad.

Actualmente, no existen puntos de recarga para vehículos eléctricos (VE) ni canalizaciones preparadas para su futura instalación. La iluminación es de tipo convencional y el sistema de ventilación mecánica responde únicamente a criterios normativos mínimos de seguridad, sin incorporar medidas de ahorro energético o de monitorización avanzada.

Este escenario contrasta con la evolución del parque móvil en España. Según datos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2024), el número de vehículos eléctricos en circulación en el país ha superado los 250.000, con una previsión de crecimiento exponencial a medida que se aproxima la prohibición de venta de vehículos de combustión en 2035 establecida por la Unión Europea. En comunidades urbanas, disponer de puntos de recarga en los garajes privados empieza a ser un factor diferenciador en términos de habitabilidad y de revalorización inmobiliaria. (45)

En este contexto, el garaje de la urbanización parte de una situación de clara desventaja respecto a las exigencias actuales y futuras. La ausencia de infraestructuras para la movilidad eléctrica no solo limita la adopción de vehículos eléctricos por parte de los vecinos, sino que también sitúa al conjunto residencial en una posición menos competitiva frente a otras comunidades que sí han iniciado estas adaptaciones.

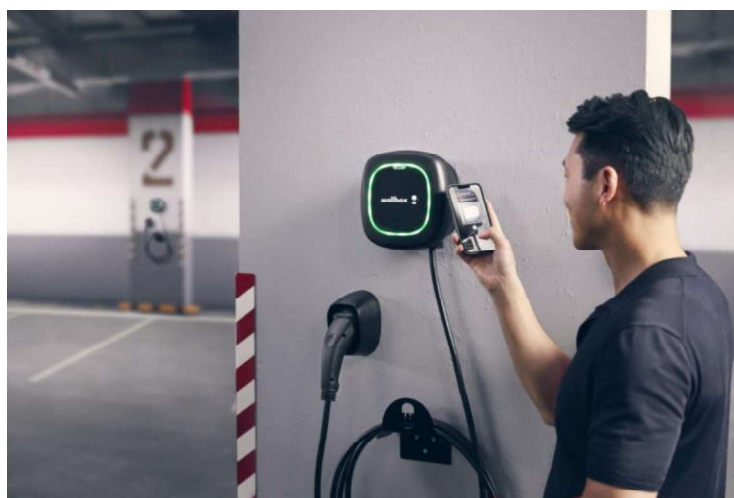


Ilustración 26: Ejemplo de punto de recarga inteligente en garaje comunitario. Fuente: Instantbox (46)

La Ilustración 27 muestra un sistema de recarga, instalado en una plaza de aparcamiento de un garaje comunitario. Este tipo de dispositivos, que integran funciones de conectividad y gestión desde el teléfono móvil, ejemplifican cómo la normativa actual impulsa la progresiva transformación de los aparcamientos en espacios preparados para la movilidad eléctrica. Su incorporación no solo responde a las obligaciones regulatorias, sino que además refuerza la imagen de modernidad y sostenibilidad de la comunidad.

7.2. Implantación de puntos de recarga de vehículos eléctricos

7.2.1. Marco normativo y requisitos técnicos

La normativa española establece desde 2021 la obligación de dotar a los garajes comunitarios de la canalización necesaria para la recarga de vehículos eléctricos en todas las plazas, aunque no se instalen puntos de recarga desde el inicio. Esta obligación se recoge en el Real Decreto 450/2022, que modifica el Código Técnico de la Edificación (CTE) y exige que en aparcamientos de más de 20 plazas se habilite, como mínimo, una preinstalación con canalizaciones y arquetas que permita la conexión posterior de cargadores. (47)

En el caso de la urbanización, al tratarse de un garaje antiguo, actualmente no existe esta infraestructura, por lo que el proyecto debería contemplar no solo la instalación de cargadores, sino también la creación de la columna vertebral eléctrica: cuadros de mando, canalizaciones y sistemas de protección.

7.2.2. Dimensionamiento inicial

Considerando un total de 127 plazas, y teniendo en cuenta que no todos los vecinos adoptarán el vehículo eléctrico en el corto plazo, se proponen dos escenarios de implantación:

1. Escenario mínimo (inicial): instalación de 6 puntos de recarga de 7,4 kW monofásicos (modo 3, conector tipo 2), distribuidos proporcionalmente entre los dos garajes.

Este escenario cubre aproximadamente un 5 % de las plazas, suficiente para atender la demanda de los primeros años.

2. Escenario recomendado (medio plazo): instalación de 12 puntos de recarga de 7,4 kW y la canalización preparada para extenderse a la totalidad de las plazas en el futuro.

Esto permitiría alcanzar una cobertura cercana al 10 % inmediato, alineada con las recomendaciones de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles.

7.2.3. Costes de implantación

Para la comunidad se propone un cargador tipo modo 3 con conector Tipo 2 y potencia 7,4 kW por plaza. Un equipo representativo y disponible en España es el Wallbox Pulsar Plus 7,4 kW con manguera de 5 m, cuyo precio de venta al público es 649,99 €. (48)



Ref. 84043370

Cargador Wallbox Pulsar Plus negro de potencia hasta 7,4 kW y manguera de 5m

649,99 €

Paga a plazos con 

Vendido y enviado por **Elestore**

[3 ofertas más a partir de 647 € >](#)

Cantidad

Ilustración 27: Cargador Wallbox 7,4 kW. Fuente: Leroy Merlin (48)

El coste de instalación depende de la longitud de cableado, sección, protecciones, obra auxiliar y si la acometida es monofásica o trifásica. Referencias de instaladores especializados en España sitúan la instalación completa (materiales + mano de obra) en un rango típico de 750 € por punto, pudiendo subir en casos complejos (tramos largos, perforaciones, cuadros saturados...) (49)

En garajes comunitarios conviene prever un “backbone” eléctrico (canalizaciones troncales y cuadro de protección común) y un sistema de gestión/balanceo para repartir potencia disponible, registrar consumos y facilitar futuras ampliaciones.

Concepto	Supuesto	6 puestos carga	12 puestos carga
Equipo	Wallbox Pulsar Plus 7,4 kW	3.899,94 €	7.799,88 €
Instalación por punto	Cableado/obra, protecciones	4.500 €	9.000 €
Backbone y gestión	Canalización troncal, cuadro, balanceo/medición	1.500 €	2.000 €
Total inversión	Equipo + instal. + backbone	9.899,94 €	18.799,88 €

Tabla 7: Coste estimado por escenario

La Tabla 7 recoge la estimación de costes de implantación de puntos de recarga en los garajes comunitarios. Se han considerado dos escenarios: uno reducido con 6 puestos de carga y otro más ambicioso con 12 puestos. En ambos casos se ha tomado como equipo de referencia el Wallbox Pulsar Plus 7,4 kW, con un coste unitario de 649,99 €, lo que supone una inversión en equipos de 3.899,94 € y 7.799,88 €, respectivamente. A esta cifra se suma el coste de la instalación eléctrica por punto (cableado, protecciones, obra auxiliar), valorada en 750 € por unidad, alcanzando los 4.500 € en el primer escenario y 9.000 € en el segundo. Finalmente, se incorpora un coste único asociado al backbone eléctrico y al sistema de gestión y balanceo de potencia, que asciende a 1.500 € en el escenario mínimo y 2.000 € en el recomendado. Con todo ello, la inversión total se sitúa en torno a 9.900 € para seis puestos y 18.800 € para doce,

reflejando un rango de costes realista y fácilmente extrapolable a las necesidades de la comunidad.

Del análisis de la Tabla 7 se desprende que la inversión necesaria para dotar al garaje comunitario de infraestructura de recarga es moderada y escalable. El escenario de 6 puntos de carga representa una primera fase de implantación con una inversión contenida (9.900 €), suficiente para dar cobertura inicial a los residentes que ya disponen de vehículo eléctrico o híbrido enchufable. Por otro lado, el escenario de 12 puntos (18.800 €) permitiría anticiparse a la creciente demanda prevista en los próximos años, ofreciendo una cobertura más amplia y reduciendo la necesidad de futuras obras adicionales. La inclusión del backbone eléctrico y del sistema de gestión garantiza que la instalación es ampliable en el tiempo, de forma que, incluso partiendo con 6 unidades, se podrían añadir más cargadores en fases sucesivas sin rehacer por completo la infraestructura. Este planteamiento asegura una solución técnicamente robusta, económicamente viable y alineada con las tendencias de electrificación de la movilidad urbana.

7.2.4. Beneficios asociados

La instalación de puntos de recarga en el garaje comunitario no debe entenderse únicamente como un gasto de inversión, sino como una medida estratégica con múltiples beneficios a medio y largo plazo. Estos beneficios pueden agruparse en tres grandes dimensiones: económica, social y ambiental, además de la revalorización patrimonial de la urbanización.

En primer lugar, desde la perspectiva económica, la instalación de un sistema troncal y de recarga gestionada permite que los costes de electricidad se repartan de forma individualizada entre los usuarios de los cargadores, evitando que el consumo eléctrico adicional recaiga en la comunidad. Esto se logra gracias a los sistemas de balanceo de carga y medición individual, de modo que cada vecino asume únicamente el coste de la energía consumida para su vehículo. Además, la instalación temprana (fase de 6 cargadores) facilita el acceso a subvenciones y ayudas públicas, como las previstas en el Programa MOVES III, que financia hasta un 70 % del coste de la instalación en comunidades de vecinos. Este factor reduce notablemente el periodo de retorno y facilita la rentabilidad de la medida.

En segundo lugar, los beneficios sociales son evidentes. La disponibilidad de infraestructura de recarga dentro de la propia urbanización elimina la barrera de acceso a la movilidad eléctrica para los vecinos, fomentando que la transición hacia este tipo de vehículos sea más sencilla y atractiva. La falta de puntos de carga privados es actualmente uno de los mayores obstáculos para la adopción del vehículo eléctrico en entornos urbanos. Disponer de este servicio dentro de la comunidad mejora la calidad de vida, aumenta la satisfacción de los residentes y posiciona a la urbanización como un referente en modernidad y sostenibilidad.

En tercer lugar, los beneficios medioambientales son igualmente significativos. Cada vehículo eléctrico que sustituye a uno de combustión reduce las emisiones directas de

CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2.5}), contaminantes asociados a problemas de salud pública y calidad del aire en ciudades como Madrid. Por ejemplo, se estima que la sustitución de un coche de gasolina por uno eléctrico evita 1,5–2 toneladas de CO₂ al año. La implantación de puntos de recarga en el garaje, por tanto, tiene un efecto multiplicador sobre la huella de carbono de la comunidad.

Finalmente, debe destacarse el beneficio patrimonial: la instalación de una infraestructura moderna de recarga revaloriza los garajes y, en general, las viviendas de la urbanización. Diversos informes inmobiliarios apuntan a que los inmuebles con puntos de recarga para vehículos eléctricos son más atractivos en el mercado y pueden incrementar su valor en torno a un 3–5 % respecto a inmuebles comparables que no disponen de este servicio. Este aspecto es especialmente relevante de cara a futuros compradores más concienciados con la sostenibilidad.

En conjunto, la inversión en puntos de recarga no solo contribuye a cumplir con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética del edificio, sino que también refuerza la competitividad, el confort y la resiliencia futura de la comunidad frente a las nuevas tendencias de movilidad eléctrica

7.3. Análisis económico

La inversión necesaria para la instalación de puntos de recarga en el garaje se ha estimado en dos escenarios: 6 plazas equipadas y 12 plazas equipadas con cargadores tipo Wallbox Pulsar Plus 7,4 kW, considerando los costes de adquisición de los equipos, la instalación por punto y la canalización troncal de soporte. Los resultados obtenidos en el apartado anterior se resumen en la tabla ya presentada.

Escenario 6 cargadores → inversión total: 9.899,94 €

Escenario 12 cargadores → inversión total: 18.799,88 €

A partir de estos valores, es posible realizar un análisis económico que permita evaluar la viabilidad de la medida y sus implicaciones a medio y largo plazo.

7.3.1. Escenario base sin ayudas

En el escenario base, la comunidad debería asumir íntegramente el coste de la instalación. Esto supone que, de manera inicial, el gasto se reparte entre el conjunto de propietarios:

$$\text{Coste por vivienda} = \frac{\text{Inversión total}}{96}$$

- 6 cargadores → 9.899,94 € / 96 ≈ 103 € por vivienda
- 12 cargadores → 18.799,88 € / 96 ≈ 196 € por vivienda

Se observa que incluso en el escenario de 12 cargadores, el coste individualizado para cada propietario es relativamente bajo en comparación con el beneficio patrimonial que supone disponer de una infraestructura de recarga moderna en el edificio.

7.3.2. Escenario con ayudas MOVES III

En la Comunidad de Madrid, el programa MOVES III permite subvencionar hasta el 70 % de los costes de instalación de puntos de recarga en comunidades de propietarios. (50) Aplicando esta ayuda, la inversión neta a cargo de la comunidad se reduciría de forma significativa:

- 6 cargadores $\rightarrow 9.899,94 \text{ €} \times 30 \% \approx 2.970 \text{ €}$
- 12 cargadores $\rightarrow 18.799,88 \text{ €} \times 30 \% \approx 5.640 \text{ €}$

De nuevo, si se reparte el coste entre las 96 viviendas:

- 6 cargadores con ayuda $\rightarrow 31 \text{ €/vivienda}$
- 12 cargadores con ayuda $\rightarrow 59 \text{ €/vivienda}$

7.3.3. Periodo de retorno e interpretación

A diferencia de otras medidas de eficiencia energética analizadas en este trabajo, la instalación de puntos de recarga no genera un ahorro directo en costes energéticos para la comunidad (el consumo de los vehículos eléctricos se repercutirá individualmente a los usuarios). Por tanto, no existe un payback en sentido estricto.

Sin embargo, el análisis económico sigue siendo relevante porque:

- La inversión inicial es muy reducida por vivienda, sobre todo con ayudas.
- Se trata de una mejora patrimonial, que incrementa el valor de cada inmueble al disponer de una infraestructura de recarga ya instalada, alineada con la normativa vigente.
- Favorece la demanda de futuros compradores o inquilinos, que cada vez valoran más la posibilidad de cargar un vehículo eléctrico en su plaza de garaje.

En este sentido, la medida debe entenderse como una inversión estratégica y de futuro, más que como una acción con retorno financiero directo.

7.4. Análisis de emisiones

La instalación de puntos de recarga en el garaje no solo supone una mejora en la infraestructura de la comunidad, sino que también tiene un impacto ambiental positivo al facilitar la adopción de vehículos eléctricos (VE). Para cuantificar este impacto, se comparan las emisiones asociadas a un vehículo de combustión interna (VCI) frente a un vehículo eléctrico cargado en la red eléctrica española.

7.4.1. Supuestos de partida

Para realizar el cálculo, se adoptan las siguientes hipótesis:

- Número total de plazas de garaje: 127
- Kilometraje medio anual por vehículo: 12.000 km/año
- Consumo medio VCI (gasolina/diésel): 6,5 l/100 km
- Factor de emisión VCI: 2,31 kgCO₂/l (51)

- Consumo medio VE: 17 kWh/100 km
- Factor de emisión eléctrico en España: 0,18 kgCO₂/kWh

7.4.2. Emisiones anuales por vehículo

1. Vehículo de combustión interna (VCI)

$$12.000 \text{ km} \cdot \frac{6,5}{1000} \text{ l/km} \cdot 2,31 \text{ kgCO}_2/\text{l} = 1.801 \text{ kgCO}_2/\text{año}$$

2. Vehículo eléctrico (VE)

$$12.000 \text{ km} \cdot \frac{17}{1000} \text{ kWh/km} \cdot 0,18 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = 367 \text{ kgCO}_2/\text{año}$$

Reducción media de emisiones al pasar de VCI a VE:

$$1.801 - 367 = 1.434 \text{ kgCO}_2/\text{año} (\approx 1,43 \text{ tCO}_2/\text{año})$$

7.4.3. Escenarios de vehículos eléctricos

Se analizan tres escenarios posibles en el garaje de la comunidad:

- **Escenario conservador (10 % de plazas = 13 VE):**

$$13 \cdot 1,43 \text{ tCO}_2/\text{año} \approx 18,6 \text{ tCO}_2/\text{año}$$

- **Escenario intermedio (30 % de plazas = 38 VE):**

$$38 \cdot 1,43 \text{ tCO}_2/\text{año} \approx 54,3 \text{ tCO}_2/\text{año}$$

- **Escenario ambicioso (60 % de plazas = 76 VE):**

$$76 \cdot 1,43 \text{ tCO}_2/\text{año} \approx 108,7 \text{ tCO}_2/\text{año}$$

7.4.4. Interpretación de resultados

Los resultados ponen de manifiesto el enorme potencial de reducción de emisiones que supone la electrificación del parque móvil asociado al garaje:

- Incluso en un escenario conservador (13 vehículos eléctricos), la reducción equivale a las emisiones anuales de más de 40 hogares españoles en consumo eléctrico (según IDAE, $\approx 0,45 \text{ tCO}_2/\text{hogar} \cdot \text{año}$).
- En un escenario intermedio (38 vehículos), la reducción supera las 50 tCO₂/año, cifra equivalente a plantar más de 2.500 árboles ($\approx 21 \text{ kgCO}_2/\text{árbol} \cdot \text{año}$).
- El escenario ambicioso (76 vehículos) representaría una disminución de más de 100 tCO₂/año, con un impacto directo en la mejora de la huella de carbono de la comunidad.

En conclusión, la incorporación de infraestructura de recarga en el garaje no solo prepara a la comunidad para la transición energética, sino que también permite alcanzar ahorros sustanciales en emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo de manera tangible a los objetivos climáticos europeos y nacionales.

7.5. Conclusiones parciales del bloque garaje

El análisis realizado en el bloque de garaje ha permitido identificar la oportunidad que representa la instalación de puntos de recarga como medida estratégica dentro de la comunidad. Aunque esta actuación no se orienta directamente a la reducción del OPEX, sí supone un paso esencial para la modernización de la infraestructura y la alineación con las tendencias actuales de movilidad sostenible.

Desde el punto de vista económico, la inversión inicial asociada a la instalación de cargadores resulta asumible y puede ser abordada de manera progresiva (por fases), adaptándose a la demanda real de los residentes. El análisis coste-inversión refleja que, aunque no existe un retorno directo en términos de ahorro como en otras medidas estudiadas (calefacción, piscina o agua), sí se genera un valor añadido que repercute en la revalorización del inmueble, en la comodidad de los usuarios y en la preparación para el futuro.

En términos ambientales, los resultados obtenidos son particularmente relevantes: incluso con una penetración conservadora del vehículo eléctrico (10 % de las plazas), la comunidad podría evitar la emisión de más de 18 toneladas de CO₂ al año. En escenarios más ambiciosos, la reducción supera ampliamente las 50 y 100 toneladas de CO₂ anuales, respectivamente, contribuyendo de forma significativa a la descarbonización del sector residencial y del transporte.

En definitiva, la implementación de puntos de recarga en el garaje refuerza el compromiso de la comunidad con la transición energética, no solo mejorando la calidad ambiental y reduciendo la huella de carbono, sino también ofreciendo un servicio moderno y necesario a sus residentes. Este bloque, por tanto, no debe entenderse únicamente como una inversión en infraestructuras, sino como una apuesta estratégica hacia un modelo de comunidad más sostenible, eficiente y preparada para los retos de la movilidad del futuro.

8. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido realizar una auditoría energética integral de una urbanización residencial en Madrid, analizando en detalle los principales focos de consumo: calefacción centralizada, piscinas comunitarias, consumo de agua y garajes. Los resultados muestran que:

- Calefacción y ACS constituyen la partida de gasto más elevada, con sistemas obsoletos y gran potencial de mejora mediante la sustitución por aerotermia centralizada, con una reducción significativa tanto en consumo energético como en emisiones.
- Piscinas comunitarias: la instalación de cubiertas térmicas y bombas de velocidad variable permiten ahorros rápidos con periodos de retorno muy reducidos (inferiores a 2 años en algunos casos).
- Consumo de agua: la introducción de reductores de caudal y la reutilización de aguas grises permiten reducciones de hasta un 25–30 % del consumo anual, con un fuerte impacto económico positivo y beneficios ambientales evidentes.
- Garajes: la incorporación de puntos de recarga para vehículos eléctricos no es tanto una medida de ahorro directo, sino una inversión estratégica que posiciona a la comunidad en la transición hacia una movilidad más limpia y sostenible.

Impacto económico

- El conjunto de medidas planteadas muestra periodos de retorno variados: desde actuaciones de bajo coste y rápida amortización (reductores de caudal, cubiertas térmicas), hasta inversiones de mayor envergadura y plazo más largo (aerotermia centralizada, reutilización de aguas grises).
- La implementación escalonada de las medidas permite a la comunidad optimizar sus recursos, priorizando las de retorno más rápido y preparando el terreno para las inversiones estratégicas.
- El análisis económico ha demostrado que, en conjunto, la urbanización podría reducir más del 40 % de sus costes energéticos y de agua a medio plazo, mejorando la competitividad y reduciendo la presión de las cuotas comunitarias.

En la Tabla 8 se recogen de manera sintética las inversiones y ahorros estimados para las medidas propuestas en la urbanización. Se aprecia que existen actuaciones de retorno inmediato (cubiertas térmicas y reductores de caudal, con paybacks inferiores a 3 años), que deberían priorizarse como primeras fases de la estrategia de mejora. Otras actuaciones, como la aerotermia centralizada, presentan una mayor inversión inicial y un periodo de retorno más largo, pero constituyen la medida de mayor impacto económico a largo plazo.

La reutilización de aguas grises y las bombas de velocidad variable se sitúan en un rango intermedio, con retornos de 6–7 años, consolidando su viabilidad dentro de una estrategia a medio plazo. Finalmente, la instalación de puntos de recarga para vehículos eléctricos no se plantea como una medida de ahorro directo, sino como una inversión estratégica, alineada con los objetivos de movilidad sostenible y la revalorización patrimonial de la urbanización.

Medida	Inversión (CAPEX)	Ahorro anual (€)	Payback (años)
Aeroterminia centralizada	238.500 €	24.913 €	9,6
Cubiertas térmicas piscina	3.000 €	1.530 €	2,0
Bombas VSD piscina	4.898 €	717 €	6,8
Reductores de caudal (96 viviendas)	13.824 €	5.982 €	2,3
Reutilización de aguas grises	50.000 €	7.500 €	6,7
Puntos de recarga VE (12 uds.)	18.800 €	—	—

Tabla 8: Resumen económico de las medidas propuestas

Impacto ambiental

- La sustitución del gasóleo por aeroterminia centralizada reduce las emisiones de CO₂ en más de 100 toneladas anuales, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.
- La gestión eficiente del agua y la reducción de consumos disminuyen la huella hídrica de la comunidad, alineándose con los objetivos de sostenibilidad en un contexto de creciente escasez de recursos.
- Las medidas planteadas convierten a la urbanización en un ejemplo de comunidad residencial baja en carbono, en línea con los compromisos europeos de neutralidad climática.

La Tabla Y resume el impacto ambiental en términos de emisiones de CO₂ evitadas. La medida con mayor efecto es la sustitución de la calefacción de gasóleo por aeroterminia centralizada, con un ahorro de unas 105 toneladas de CO₂ anuales, lo que representa más del 70 % del potencial total de reducción.

El resto de las medidas, aunque de menor escala, son complementarias y contribuyen a un ahorro adicional conjunto de más de 35 tCO₂/año, destacando la reutilización de aguas grises y la instalación de reductores de caudal. La instalación de puntos de recarga para vehículos eléctricos, aunque depende del grado de penetración del parque automovilístico, puede alcanzar reducciones significativas en los próximos años, del orden de 20 tCO₂/año en un escenario de adopción del 30 %.

En conjunto, la urbanización podría reducir del orden de 140 tCO₂/año, situándose en un modelo residencial bajo en carbono y alineado con los objetivos de neutralidad climática marcados por la Unión Europea.

Medida	Emisiones evitadas (tCO ₂ /año)
Aerothermia centralizada	105 tCO ₂
Cubiertas térmicas piscina	4 tCO ₂
Bombas VSD piscina	1 tCO ₂
Reductores de caudal	6 tCO ₂
Reutilización de aguas grises	8 tCO ₂
Puntos de recarga VE	20 tCO ₂

Tabla 9: Resumen ambiental de las medidas propuestas

Impacto social

- La mejora de la eficiencia energética y la reducción de consumos no solo tienen un impacto económico, sino que también elevan el confort de los residentes (mejor climatización, ahorro de agua, instalaciones modernizadas).
- La revalorización de las viviendas es un beneficio indirecto pero clave: una comunidad con infraestructuras sostenibles y modernas resulta mucho más atractiva para futuros compradores e incrementa el valor patrimonial.
- La instalación de puntos de recarga para vehículos eléctricos facilita la adopción de movilidad sostenible, anticipando tendencias y necesidades sociales.

Alineación estratégica

El proyecto se alinea directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas, especialmente con el ODS 7 (energía asequible y no contaminante), ODS 11 (ciudades sostenibles) y ODS 13 (acción por el clima). De este modo, se demuestra que las comunidades residenciales pueden ser actores relevantes en la transición energética y en la lucha contra el cambio climático.

En definitiva, este trabajo ha puesto de manifiesto que la auditoría energética no es solo un ejercicio técnico, sino una herramienta estratégica que permite a las comunidades de vecinos tomar decisiones fundamentadas, mejorar su sostenibilidad, reducir costes y aumentar el valor de su patrimonio.

La urbanización analizada tiene un enorme potencial de transformación: con una hoja de ruta bien definida y la implementación de las medidas propuestas, puede convertirse en un modelo de eficiencia y sostenibilidad para otras comunidades residenciales de Madrid y del resto de España. El conjunto de medidas no solo es técnica y económicamente viable, sino que sitúa a la urbanización como un referente en la transición energética residencial, anticipando exigencias normativas y sociales de la próxima década.

9. Bibliografía

1. Schneider Electric. ¿Por qué es tan importante reducir el consumo en edificios? *Blog Schneider Electric España*. [En línea] 19 de Abril de 2023. <https://blogspanol.se.com/edificios/2023/04/19/por-que-es-tan-importante-reducir-el-consumo-en-edificios/>.
2. Construable. Consumo energético del sector residencial. *Construable*. [En línea] <https://www.construable.es/2012/01/20/consumo-energetico-del-sector-residencial>.
3. Unidas, Naciones. Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Naciones Unidas - Desarrollo Sostenible*. [En línea] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
4. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Guía Práctica de la Energía. Consumo Eficiente y Responsable. [En línea] 2007. <https://www.estudiomc.es/documentos/guia-practica-de-la-energia-idae.pdf>.
5. Calefacción central o individual: cuál es más barata. *Stechome*. [En línea] 2022. <https://www.stechome.es/la-eterna-pregunta-calefaccion-centralizada-o-individual/>.
6. Yoigo Luz y Gas. Calefacción central o individual: ¿qué consume menos? [En línea] 2023. <https://www.yoigoluzygas.com/blog/calefaccion-central-o-individual-que-consume-menos/>.
7. Bilbao, Agustín Marina. Calefacción central en columna. Repartidores de costes. *SlideShare*. [En línea] <https://es.slideshare.net/slideshow/efi-ener10-office972003final-61411438>.
8. Instalfrica. Aerotermia como funciona: descubre su poder en 2025. *Instalfrica*. [En línea] 2025. <https://instalfrica.es/aerotermia-como-funciona/>.
9. Standard Hidráulica. Instalaciones centralizadas utilizando aerotermia. *STHexpert*. [En línea] 2024. <https://sthexpert.standardhidraulica.com/instalaciones-centralizadas-aerotermia/>.
10. E-ficiencia. Instalación de Aerotermia: Requisitos y Precio. *E-ficiencia*. [En línea] 2023. <https://e-ficiencia.com/instalacion-de-aerotermia-requisitos-precio/>.
11. CostE-Energía. Evolución del precio medio anual de la luz (PVPC) - 2025. *CostE-Energía*. [En línea] 2025. <https://www.costeenergia.es/historico/pvpc-anual>.
12. Instalaciones Sánchez Braojos. Sistemas Híbridos. *Instalaciones Sánchez Braojos*. [En línea] 2024. <https://sanchezbraojos.es/sistemas-hibridos/>.
13. Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Hybrid heat pumps - Final report. *GOV.UK*. [En línea] 2018. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5ad6142040f0b617dca714c5/Hybrid_heat_pumps_Final_report-.pdf.

14. Siemens. Variable speed drives. *Siemens*. [En línea] <https://www.siemens.com/uk/en/products/buildingtechnologies/hvac/variable-speed-drives.html>.
15. ROCKWOOL Group. Pipe Insulation. [En línea] <https://www.rockwool.com/group/products-and-applications/hvac-insulation/pipe-insulation/>.
16. Siemens. HVAC Optimization. *Siemens*. [En línea] <https://www.siemens.com/global/en/products/buildings/energy-sustainability/hvac-optimization.html>.
17. Cambio Energético. ¿Cuál es la vida útil de un sistema de aerotermia? *Cambio Energético*. [En línea] <https://www.cambioenergetico.com/blog/vida-util-aerotermia/>.
18. Energanova. Aerotermia: precio para una vivienda unifamiliar. *Energanova*. [En línea] <https://energanova.es/aerotermia-precio-para-una-vivienda-unifamiliar/>.
19. RutamSoft. Price List – Mitsubishi Electric HVAC and Related Products. *RutamSoft*. [En línea] 2023. https://rutamsoft.com/pricelist/mitsubishi_pricelist.pdf.
20. Habitissimo. Presupuesto electricistas. *Habitissimo*. [En línea] 2024. <https://www.habitissimo.es/presupuestos/electricistas>.
21. Naturclima. Precio de la Aerotermia con instalación incluida 2025. *Naturclima*. [En línea] 2025. <https://www.naturclima.energy/precio-aerotermia/>.
22. Aerotermia360. Subvenciones para Aerotermia en Madrid 2025 - Ayudas, Requisitos y Ahorros. *Aerotermia360*. [En línea] 2025. <https://aerotermia360.es/ayudas-comunidad-madrid/>.
23. Autosolar. Ayudas y Subvenciones aerotermia Madrid 2025. *AutoSolar*. [En línea] 2025. <https://autosolar.es/instalacion-aerotermia/subvenciones-aerotermia-madrid-cuales-son>.
24. Idealista News. Renta 2024: ahorra en el IRPF mejorando la eficiencia energética de tu vivienda. *Idealista News*. [En línea] 2025. <https://www.idealista.com/news/fiscalidad/2025/06/12/847866-renta-2024-ahorra-en-el-irpf-mejorando-la-eficiencia-energetica-de-tu-vivienda>.
25. Natural Home. Vida útil de la aerotermia: información técnica y consejos prácticos. *Natural Home*. [En línea] 2024. <https://www.natural-home.es/blog/vida-util-aerotermia>.
26. Grupo Nice Pool. Funcionamiento del filtro de arena en las piscinas. *Grupo Nice Pool*. [En línea] 2025. <https://gruponicepool.wordpress.com/2015/06/01/funcionamiento-del-filtro-de-arena-en-las-piscinas/>.

27. Grupo Poolplus. Cubierta Térmica Flotante Geobubble 700 micras. *Grupo Poolplus*. [En línea] <https://grupopoolplus.com/es/climatizacion-piscina-y-cubiertas/642807-cubierta-termica-flotante-geobubble-700micras.html?srsId=AfmBOoo8Fx31zfLPHjM-Zl3fOfvFCa8-HMZimEViA0F8YfF-0iiaZtYp>.
28. Quimipool. Cobertores térmicos para piscina. *Quimipool*. [En línea] https://www.quimipool.com/123-cobertores-termicos-piscina?srsId=AfmBOopsOqebIYenGkuWb5KdzGwWNehZFR0rf4fLWtN3o_NYzwFm-KAn.
29. Vestatex. Lonas térmicas para piscinas. *Vestatex*. [En línea] https://vestatex.es/lonas-para-piscinas/lonas-termicas/?utm_source=chatgpt.com.
30. Swimhome. Manta térmica GeoBubble EnergyGuard Selective Transmission (500-800 micras). *Swimhome*. [En línea] https://swimhome.es/es/manta-termica/geobubble-energyguard-selective-transmission-21913-1737.html#/814-configuracion-a_medida.
31. Outlet Piscinas. Bomba velocidad variable VSD Magnus. *Outlet Piscinas*. [En línea] <https://www.outlet-piscinas.com/bomba-vsd-magnus-velocidad-variable>.
32. —. Bomba velocidad variable VSD Magnus. *Outlet Piscinas*. [En línea] <https://www.outlet-piscinas.com/bomba-vsd-magnus-velocidad-variable>.
33. OCU. Reductores de caudal y economizadores de agua. *Organización de Consumidores y Usuarios*. [En línea] <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/equipamiento-hogar/consejos/reductores-de-caudal-para-ahorrar-agua>.
34. Lawrence Berkeley National Laboratory. Calculating average hot water mixes of residential plumbing fixtures. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. [En línea] 2020. https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl_hw_mixes_0.pdf.
35. Leroy Merlin. Ducha limitador reductor de flujo set – hasta 70 % de ahorro de agua (4 l/min). *Leroy Merlin*. [En línea] <https://www.leroymerlin.es/productos/ducha-limitador-reductor-de-flujo-set-hasta-70-de-ahorro-de-agua-4-l-min-84515838.html>.
36. Aqua España. Píldora de conocimiento 8: Aguas grises: origen, composición y tecnologías para su reciclaje. *Aqua España*. [En línea] 2018. https://aquaespana.org/sites/default/files/documents/files/Pildora_08-Grises_origen.pdf.
37. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Real Decreto 1085/2024, de 22 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de reutilización del agua. *BOE (Boletín Oficial del Estado)*. [En línea] 2024. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2024-21701>.
38. El País. Aprovechar el agua de la ducha para llenar las cisternas del váter: Barcelona obligará a los nuevos edificios a implantar este ahorro. [En línea] 24 de Octubre de 2024. <https://elpais.com/espana/catalunya/2024-10-24/aprovechar-el-agua-de-la->

ducha-para-llenar-las-cisternas-del-vater-barcelona-obligara-a-los-nuevos-edificios-a-implantar-este-ahorro.html.

39. Fundación Aquae. ¿En qué se utiliza el agua en España? *Fundación Aquae*. [En línea] <https://www.fundacionaquae.org/en-que-se-utiliza-el-agua-en-espana/F>.

40. Ruberte. Reutilización de aguas grises. *Ruberte*. [En línea] 29 de Abril de 2025. <https://www.ruberte.es/reutilizacion-de-aguas-grises>.

41. Caloryfrio. Instalaciones para la reutilización centralizada de las aguas grises en los edificios. *Caloryfrio*. [En línea] 2 de Julio de 2025. <https://www.caloryfrio.com/bano-agua/instalaciones-reutilizacion-centralizada-aguas-grises-edificios.html>.

42. Metertech Soluciones Ambientales. Tratamiento de aguas grises para reuso. *Metertech Soluciones Ambientales*. [En línea] <https://metertech.com.ar/tratamiento-de-aguas-residuales/tratamiento-de-aguas-grises-para-reuso/>.

43. Roth Ibérica. AquaServe® – Reutilización de aguas grises domésticas. *Roth Ibérica*. [En línea] 2025. <https://www.roth-spain.com/reutilizacion-aguas-grises/aquaserve>.

44. Vallés, Laia Domènech / Maria. LOCAL REGULATIONS ON ALTERNATIVE WATER SOURCES. [En línea] 2014. <https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/7fd79655-3bda-40ea-937b-459985ca303d/content>.

45. Eranovum Energy. ¿Cuántos coches eléctricos hay en España? *Eranovum Energy*. [En línea] 5 de Marzo de 2025. <https://eranovum.energy/es/blog/cuantos-coches-electricos-espana/#:~:text=El%20Anuario%20de%20AEDIVE%20recoge,o%20veh%C3%ADculos%20h%C3%ADbridos%20el%C3%A9ctricos%20enchufables>.

46. Instantbox. Normativa instalación punto recarga garaje comunitario. *Instantbox*. [En línea] <https://instantbox.com/blog/normativa-instalacion-punto-recarga-garaje-comunitario/>.

47. Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. Real Decreto 450/2022, de 14 de junio, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. *BOE*. [En línea] 2022. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-9848>.

48. Leroy Merlin. Cargador Wallbox Pulsar Plus negro de potencia hasta 7,4 kW y manguera de 5 m. *Leroy Merlin*. [En línea] <https://www.leroymerlin.es/productos/cargador-wallbox-pulsar-plus-negro-de-potencia-hasta-7-4-kw-y-manguera-de-5m-84043370.html>.

49. LugEnergy. Solicitar presupuesto – LugEnergy. *LugEnergy*. [En línea] <https://www.lugenergy.com/solicitar-presupuesto-lugenergy/>.

50. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Programa MOVES III en la Comunidad de Madrid. *Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid*. [En línea] <https://movestresmadrid.com/>.

51. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Consumo de carburante y emisiones. *IDAE*. [En línea] <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones>.

10. Anexos

Guía técnica

Condiciones climáticas exteriores de proyecto

4

Datos recogidos

1) Geográficos relativos a la estación

LAT: Latitud (°)

LONG: Longitud (°)

a.s.n.m. (m): Altura sobre el nivel del mar (m)

2) Relativos a las condiciones de diseño de equipos y cálculo de cargas

Se distinguirá entre datos necesarios para calefacción y refrigeración, utilizando el concepto de nivel percentil (porcentaje de horas anuales en los que la temperatura de la localidad es sobrepasado por un cierto valor, es decir, el valor de la temperatura seca de una localidad con un nivel percentil del 0,4 % supone que un número de horas de $24 \times 365 \times 0,4 / 100 = 35$ h la temperatura de dicha localidad está por encima de este valor).

Datos referidos a calefacción:

TS (99,6%): temperatura seca (°C) de la localidad con un percentil del 99,6%.

TS (99%): temperatura seca (°C) de la localidad con un percentil del 99%.

TSMIN: temperatura seca (°C) mínima registrada en la localidad.

OMDC: oscilación media diaria (°C) (máxima-mínima diaria) de los días en los que alguna de sus horas están dentro del nivel percentil del 99%.

HUMcoín: Humedad relativa media coincidente (%) (se da a la vez que se tiene el nivel percentil del 99% en temperatura seca).

Datos referidos a refrigeración:

TS (0,4%): temperatura seca (°C) de la localidad con un percentil del 0,4%.

THC (0,4%): temperatura húmeda coincidente (°C) en el mismo instante que se tiene una temperatura seca con el nivel percentil del 0,4%.

TS (1%): temperatura seca (°C) de la localidad con un percentil del 1%.

THC (1%): temperatura húmeda coincidente (°C) en el mismo instante que se tiene una temperatura seca con el nivel percentil del 1%.

TS (2%): temperatura seca (°C) de la localidad con un percentil del 2%.

THC (2%): temperatura húmeda coincidente (°C) en el mismo instante que se tiene una temperatura seca con el nivel percentil del 2%.

OMDR: oscilación media diaria (°C) (máxima-mínima diaria) de los días en los que alguna de sus horas están dentro del nivel percentil del 1%.

TSMAX: temperatura seca (°C) máxima registrada en la localidad.

TH (0,4%): temperatura húmeda (°C) de la localidad con un percentil del 0,4%.

TSC (0,4%): temperatura seca coincidente (°C) cuando se tiene una temperatura húmeda con el nivel percentil del 0,4%.

TH (1%): temperatura húmeda (°C) de la localidad con un percentil del 1%.

TSC (1%): temperatura seca coincidente (°C) cuando se tiene una temperatura húmeda con el nivel percentil del 1%.

TH (2%): temperatura húmeda (°C) de la localidad con un percentil del 2%.

TSC (2%): temperatura seca coincidente (°C) cuando se tiene una temperatura húmeda con el nivel percentil del 2%.

OMA: oscilación media anual de temperatura seca (°C). Se define como la diferencia de la temperatura seca con un nivel percentil del 0,4% respecto a la temperatura seca con un 99,6%, es decir:

$$OMA = TSC (0,4\%) - TS (99,6\%)$$

Para extrapolar las condiciones de diseño en función de la hora solar y del mes considerado es de aplicación la norma UNE 100014-1984.

3) Relativos a cálculos simples de demanda de calefacción y ACS

TA: temperatura seca media mensual (°C).

TASOL: temperatura seca media mensual durante las horas de sol (°C).

TTERR: temperatura media mensual del terreno (°C) a una profundidad de 20 cm. (Se podría establecer una correlación con la anterior, o viceversa; ver anexo 1).

RADH: radiación media diaria sobre superficie horizontal en forma mensual (kWh/m²).

GD15/15: grados día de calefacción con base 15/15 en forma mensual. Suma mensual del valor horario de la temperatura seca con respecto a 15°C dividido por 24 y únicamente contabilizando los valores negativos (se expresa finalmente en número absoluto dicho valor).

GD20/20C: grados día de calefacción con base 20/20 en forma mensual. Suma mensual del valor horario de la temperatura seca con respecto a 20°C dividido por 24 y únicamente contabilizando los valores negativos (se expresa finalmente en número absoluto dicho valor).

GD20/20R: grados día de refrigeración con base 20/20 en forma mensual. Suma mensual del valor horario de la temperatura seca con respecto a 20°C dividido por 24 y únicamente contabilizando los valores positivos.

Para estimar la temperatura del agua de red para las diferentes capitales de provincia utilizar la norma UNE 94002-2005.

Provincia	Estación	Indicativo
Madrid	Navacerrada (Puerto)	2462

UBICACIÓN: AISLADO**Nº DE OBSERVACIONES Y PERIODO**

a.s.n.m. (m)	Lat.	Long.	T seca	Hum. relativa	T terreno	Rad
1890	40°46'50"	04°00'37"W	87.600 (1998-2007)	(3) 29.200 (1998-2007)	14.600 (1998-2007)	

CONDICIONES PROYECTO CALEFACCIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÍNIMA)

TSMIN (°C)	TS_99,6 (°C)	TS_99 (°C)	OMDC (°C)	HUMcoin (%)	OMA (°C)
-17,5	-9,8	-8,2	6,0	93	35,9

CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÁXIMA)

TSMAX (°C)	TS_0,4 (°C)	THC_0,4 (°C)	TS_1 (°C)	THC_1 (°C)	TS_2 (°C)	THC_2 (°C)	OMDR (°C)
31,3	26,1	15,1	24,8	14,6	23,2	14,1	11,6

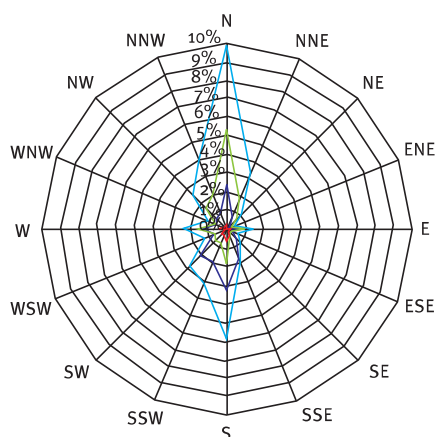
CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA HÚMEDA EXTERIOR MÁXIMA)

TH_0,4 (°C)	TSC_0,4 (°C)	TH_1 (°C)	TSC_1 (°C)	TH_2 (°C)	TSC_2 (°C)
15,6	25,0	15,0	24,4	14,2	23,4

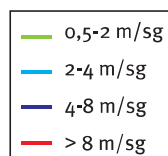
VALORES MEDIOS MENSUALES

Mes	TA (°C)	TASOL (°C)	GD_15 (°C)	GD_20	GDR_20	RADH(kWh/m² día)	TTERR (°C)
Enero	-0,5	0,5	480	635	0		1,3
Febrero	0,1	1,2	421	563	0		1,5
Marzo	2,1	3,4	398	553	0		2,7
Abril	3,1	4,3	358	507	0		4,9
Mayo	7,7	9,0	235	382	1		8,8
Junio	14,3	16,1	75	182	10		15,6
Julio	16,4	18,3	46	133	22		19,2
Agosto	16,4	18,2	43	134	21		18,9
Septiembre	12,3	14,2	107	233	4		15,1
Octubre	7,1	8,4	247	400	0		9,5
Noviembre	1,7	2,6	399	549	0		4,7
Diciembre	0,2	1,1	458	613	0		1,9

Rosa de los vientos: velocidad media 2,95 m/s



Valores normales. Periodo 1971-2000. Madrid. Puerto de Navacerrada
Rosa de los vientos. Anual



Calmas: 15%

Provincia	Estación	Indicativo
Madrid	Madrid (Barajas)	3129

UBICACIÓN: AEROPUERTO
Nº DE OBSERVACIONES Y PERIODO

a.s.n.m. (m)	Lat.	Long.	T seca	Hum. relativa	T terreno	Rad
582	40°27'15"	03°32'39"W	87.600 (1998-2007)	(3) 29.200 (1998-2007)		12.720 (2005-2007)

CONDICIONES PROYECTO CALEFACCIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÍNIMA)

TSMIN (°C)	TS_99,6 (°C)	TS_99 (°C)	OMDC (°C)	HUMcoin (%)	OMA (°C)
-10,5	-3,8	-2,4	14,6	84	40,2

CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÁXIMA)

TSMAX (°C)	TS_0,4 (°C)	THC_0,4 (°C)	TS_1 (°C)	THC_1 (°C)	TS_2 (°C)	THC_2 (°C)	OMDR (°C)
40,7	36,4	19,1	35,2	19,0	33,7	18,8	18,7

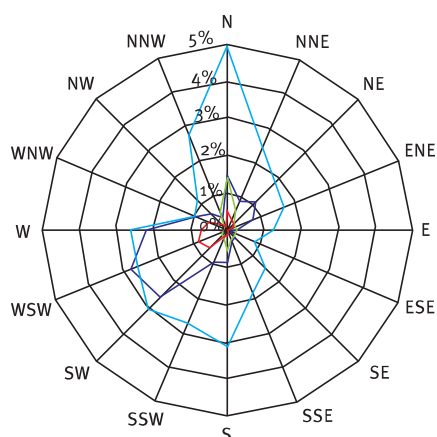
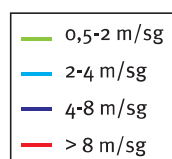
CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA HÚMEDA EXTERIOR MÁXIMA)

TH_0,4 (°C)	TSC_0,4 (°C)	TH_1 (°C)	TSC_1 (°C)	TH_2 (°C)	TSC_2 (°C)
20,8	32,8	20,0	32,6	19,2	32,6

VALORES MEDIOS MENSUALES

Mes	TA (°C)	TASOL (°C)	GD_15 (°C)	GD_20	GDR_20	RADH (kWh/m² día)	TTERR (°C)
Enero	5,2	7,2	305	459	0	2,0	
Febrero	6,9	9,3	233	371	0	3,0	
Marzo	10,3	12,6	162	302	2	4,4	
Abril	12,4	14,5	113	237	7	5,3	
Mayo	16,8	19,0	49	139	40	6,3	
Junio	23,3	26,0	6	37	137	7,2	
Julio	25,6	28,0	1	17	190	7,4	
Agosto	25,1	27,5	1	18	176	6,7	
Septiembre	20,7	23,4	11	60	81	5,0	
Octubre	15,0	17,5	58	170	13	3,0	
Noviembre	8,8	11,0	190	336	0	1,9	
Diciembre	5,4	7,5	297	451	0	2,0	

Rosa de los vientos: velocidad media 2,52 m/s


 Valores normales. Periodo 1971-2000. Madrid. Barajas
 Rosa de los vientos. Anual


Calmas: 38%

Provincia	Estación	Indicativo
Madrid	Torrejón de Ardoz (Base Aérea)	3175

UBICACIÓN: AEROPUERTO**Nº DE OBSERVACIONES Y PERIODO**

a.s.n.m. (m)	Lat.	Long.	T seca	Hum. relativa	T terreno	Rad
611	40°29'00"	03°27'01"W	87.600 (1998-2007)	(4) 14.600 (1998-2007)		

CONDICIONES PROYECTO CALEFACCIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÍNIMA)

TSMIN (°C)	TS_99,6 (°C)	TS_99 (°C)	OMDC (°C)	HUMcoin (%)	OMA (°C)
-11,1	-3,6	-2,0	14,2	86	40,4

CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÁXIMA)

TSMAX (°C)	TS_0,4 (°C)	THC_0,4 (°C)	TS_1 (°C)	THC_1 (°C)	TS_2 (°C)	THC_2 (°C)	OMDR (°C)
40,7	36,8	21,0	35,4	20,8	34,0	20,6	18,6

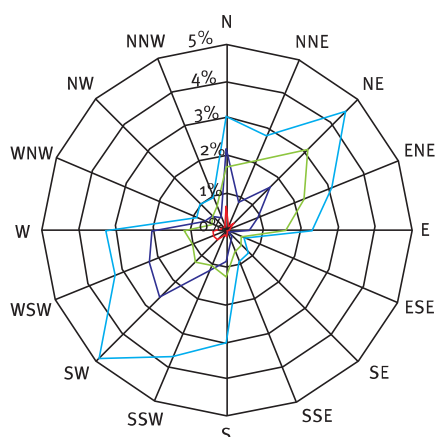
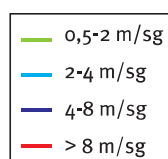
CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA HÚMEDA EXTERIOR MÁXIMA)

TH_0,4 (°C)	TSC_0,4 (°C)	TH_1 (°C)	TSC_1 (°C)	TH_2 (°C)	TSC_2 (°C)
22,2	34,0	21,4	33,9	20,8	33,8

VALORES MEDIOS MENSUALES

Mes	TA (°C)	TASOL (°C)	GD_15 (°C)	GD_20	GDR_20	RADH (kWh/m² día)	TTERR (°C)
Enero	5,3	7,4	302	457	0		
Febrero	6,9	9,6	231	370	0		
Marzo	10,4	12,8	161	299	2		
Abril	12,5	14,9	110	233	8		
Mayo	17,0	19,4	46	134	42		
Junio	23,5	26,2	5	35	140		
Julio	25,6	28,3	1	16	192		
Agosto	25,1	27,7	1	18	176		
Septiembre	20,7	23,7	10	59	81		
Octubre	15,0	17,6	58	169	13		
Noviembre	8,8	11,1	191	337	0		
Diciembre	5,5	7,7	294	449	0		

Rosa de los vientos: velocidad media 2,71 m/s

Valores normales. Periodo 1971-2000. Madrid. Torrejón
Rosa de los vientos. Anual

Calmas: 21%

Provincia	Estación	Indicativo
Madrid	Colmenar Viejo (FAMET)	3191E

UBICACIÓN: AEROPUERTO
Nº DE OBSERVACIONES Y PERIODO

a.s.n.m. (m)	Lat.	Long.	T seca	Hum. relativa	T terreno	Rad
1004	40°41'55"	03°45'52"W	87.600 (1998-2007)	(4) 14.600 (1998-2007)		

CONDICIONES PROYECTO CALEFACCIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÍNIMA)

TSMIN (°C)	TS_99,6 (°C)	TS_99 (°C)	OMDC (°C)	HUMcoin (%)	OMA (°C)
-9,8	-2,4	-1,0	7,8	70	35,4

CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÁXIMA)

TSMAX (°C)	TS_0,4 (°C)	THC_0,4 (°C)	TS_1 (°C)	THC_1 (°C)	TS_2 (°C)	THC_2 (°C)	OMDR (°C)
36,7	33,0	18,5	31,8	18,5	30,4	18,3	13,0

CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA HÚMEDA EXTERIOR MÁXIMA)

TH_0,4 (°C)	TSC_0,4 (°C)	TH_1 (°C)	TSC_1 (°C)	TH_2 (°C)	TSC_2 (°C)
19,8	30,9	19,2	30,4	18,6	30,0

VALORES MEDIOS MENSUALES

Mes	TA (°C)	TASOL (°C)	GD_15 (°C)	GD_20	GDR_20	RADH (kWh/m² día)	TTERR (°C)
Enero	4,7	6,0	321	476	0	2,2	
Febrero	6,2	7,7	249	390	0	3,1	
Marzo	8,8	10,3	196	346	0	4,3	
Abril	10,3	11,8	156	294	2	5,4	
Mayo	14,9	16,5	70	177	18	6,3	
Junio	21,4	23,2	9	47	87	7,6	
Julio	23,6	25,5	3	24	135	7,6	
Agosto	23,2	25,1	3	25	126	6,7	
Septiembre	19,0	21,0	15	75	46	5,1	
Octubre	13,3	15,0	83	213	4	3,2	
Noviembre	7,6	9,1	222	371	0	2,2	
Diciembre	5,1	6,4	308	463	0	1,7	



IDAIE
Instituto para la Diversificación
y Ahorro de la Energía

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

Madrid. Febrero de 2014

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

1. INTRODUCCIÓN.

En la **Directiva 2009/28/CE** se reconoce como energía renovable, en determinadas condiciones, la energía capturada por bombas de calor, según se dice en su artículo 5 y se define en el Anexo VII: Balance energético de las bombas de calor.

Las bombas de calor que podrán considerarse como renovables son aquellas en las que la producción final de energía supere de forma significativa el insumo de energía primaria necesaria para impulsar la bomba de calor.

Posteriormente, la **Decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013 (2013/114/UE)** establece el parámetro η con el valor del 45,5 %, por lo que las bombas de calor accionadas eléctricamente deben de considerarse como **renovables siempre que su SPF sea superior a 2,5**.

Dicha decisión establece que **la determinación del SPF de las bombas de calor accionadas eléctricamente debe efectuarse de acuerdo con la norma EN 14825:2012 (el SPF se refiere al SCOPnet)**³.

El presente documento pretende establecer una metodología que, utilizada por defecto a falta de una mejor información, podrá considerarse como suficiente para que determinadas bombas de calor accionadas eléctricamente puedan ser consideradas como bombas de calor renovables.

La aplicación de **esta metodología propuesta no pretende excluir u obviar la posibilidad de que cualquier fabricante de equipos pueda determinar el SPF de sus equipos mediante la aplicación de la norma EN 14825:2012**, sino que más bien pretende todo lo contrario, animar a que estos agentes realicen los cálculos necesarios para su determinación conforme a la mencionada norma tal y como se dice en la directrices. Si bien, **se considera que la justificación documental que aporte el cálculo del SPF debe ser avalada mediante la declaración de conformidad CE realizada por el fabricante, y su etiquetado energético, según regula el R.I.T.E.**⁴ y el resto de la normativa vigente.

³ El SPF se refiere al “coeficiente de rendimiento estacional neto en modo activo (SCOPnet)”, en el caso de las bombas de calor accionadas eléctricamente.

⁴ Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (Real Decreto 238/2013, de 5 de abril).

- Apartado 1 del artículo 18: Los equipos y materiales deben llevar el marcado CE y cumplir los requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía (Real Decreto 187/2011).
- IT 1.2.4.1.2.1 Requisitos mínimos de rendimientos energéticos de los generadores de calor.
 - 11. Las bombas de calor deberán cumplir los siguientes requisitos:
 - a) Los equipos de hasta 12 kW de potencia útil nominal, deberán llevar incorporados los valores de etiquetado energético (COP/SCOP) correspondientes a la normativa europea en vigor.

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

Por tanto, se ha de remarcar que **se trata de un documento de mínimos, que contiene un método sencillo, que puede permitir una primera aproximación a la estimación de los valores de SPF para las distintas tecnologías y aplicaciones de las bombas de calor accionadas eléctricamente.** Este documento en ningún caso pretende sustituir los datos de rendimiento determinados y justificados mediante la norma o normas correspondientes.

Se considera que la elaboración de este documento es un paso importante en el reconocimiento en España de la tecnología de las bombas de calor como fuente de energía renovable y debe considerarse como un documento abierto sujeto a mejoras y modificaciones que le permitan adaptarse a la realidad tecnológica pero siempre vigilando el cumplimiento de la directiva.

Es decir, para una tecnología y aplicación concreta con bomba de calor, el valor de su SPF será el determinado y justificado mediante la norma o normas correspondientes; que haya sido avalado mediante la declaración de conformidad CE realizada por el fabricante, y su etiquetado energético, según regula el R.I.T.E. y el resto de la normativa vigente.

Solo en el caso de que no sea posible calcular el SPF según lo descrito en el párrafo anterior se podría recurrir a su cálculo mediante los valores por defecto establecidos en este documento para las bombas de calor accionadas eléctricamente.

Este documento no incorpora actualmente a **las bombas de calor accionadas térmicamente**, aunque su incorporación podría hacerse en sucesivas revisiones cuando se dispongan de los datos necesarios. No obstante, a efectos de su consideración como energía renovable según la Directiva 2009/28/CE, el SPF mínimo (SPER net) de las bombas de calor accionadas mediante energía térmica es 1,15. La determinación del SPF debe efectuarse, en el caso de la relación estacional de energía primaria (SPER net), de acuerdo con la norma UNE-EN 12309.

b) Aquellos equipos de potencia útil nominal superior a 12 kW deberán llevar incorporados los valores de etiquetado energético (COP/SCOP) determinados por la normativa europea en vigor, cuando exista la misma, o por entidades de certificación europea.

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

2. OBJETO DEL INFORME.

El presente documento busca estimar los valores de SPF para las distintas tecnologías y aplicaciones de las bombas de calor accionadas eléctricamente mediante la multiplicación de su COP nominal obtenido en condiciones de ensayo por un factor de ponderación (FP) y por un factor de corrección (FC).

$$\text{SPF} = \text{COP}_{\text{nominal}} \times \text{FP} \times \text{FC}$$

El factor de ponderación tiene en cuenta las diferentes zonas climáticas de España que marca el CTE y se ha calculado mediante una metodología exclusivamente técnica, utilizando valores objetivos y los Documentos Reconocidos existentes.

El factor de corrección tiene en cuenta la diferencia entre la temperatura de distribución o uso y la temperatura para la cual se ha obtenido el COP en el ensayo.

El rendimiento medio estacional obtenido mediante la aplicación de estos factores se ha de considerar por defecto en caso de no disponer de datos de rendimiento determinados y justificados mediante la norma correspondiente.

Se ha partido del documento reconocido de la Calificación Energética ***“Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas”***, en el que se determinan los factores FP y FC ampliando su alcance a todo tipo de edificios, simplificando las distintas tipologías, estableciendo el uso del FC aplicable únicamente a las bombas de calor geotérmicas al resto de tecnologías (aerotermia e hidrotermia) y adaptándolo a la finalidad explicada anteriormente.

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

Las prestaciones medias estacionales de un equipo o sistema (SPF) se calcularán multiplicando sus prestaciones nominales (COP) por un factor denominado factor de ponderación representativo (FP) y por un factor de corrección (FC) para las distintas tecnologías y aplicaciones de las bombas de calor accionadas eléctricamente.

El documento reconocido de la Calificación Energética **“Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas”** determina los valores del FP y del FC, eligiendo de la muestra de casos estudiados el valor que se corresponde con el 15% de los casos más desfavorables. El percentil elegido hace que haya una probabilidad del 85% de que el factor real sea mejor que el valor considerado, por lo que se trata de valores que se encuentran del lado de la seguridad, muy conservadores, no de valores medios.

Así tenemos el valor de FP:

Tabla 3.1: T sis 1-3. Factores de ponderación para sistemas de calefacción por bombas de calor.

	Zona Climática				
	A	B	C	D	E
Equipos centralizados (viviendas unifamiliares)	0.79	0.71		0.68	
Equipos centralizados (viviendas en bloque)	0.79	0.75		0.68	
Equipos individuales tipo split (viviendas individuales y viviendas en bloque)	0.60	0.62		0.58	
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (viviendas unifamiliares)	1.127	1.125	1.073	1.012	0.951
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (viviendas en bloque)	1.131	1.116	1.072	1.008	0.937
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores horizontales (viviendas unifamiliares)	0.949	0.920	0.876	0.824	0.766

Y el valor de FC (solo para geotermia), según la temperatura de distribución:

Tabla 3.2: T sis 1-5. Factores de corrección para bombas de calor

Tª de distribución calefacción (°C)	Factor de corrección
35	1
40	0.868
45	0.765
50	0.677
55	0.606

geotérmicas.

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

Partiendo de este documento reconocido se realizan las siguientes **HIPÓTESIS**:

- a. Se amplía el alcance al resto de **edificios** de los valores obtenidos para viviendas. De esta forma se estaría del lado de la seguridad, ya que los patrones de uso de las bombas de calor para calefacción en las viviendas son generalmente más desfavorables que los de edificios del sector terciario, por ejemplo edificios de oficinas.
- b. Se considera necesario **aplicar a todas las bombas de calor accionadas eléctricamente el mismo factor de corrección (FC)**. Se ha partido del factor que se propone en el documento reconocido citado anteriormente para las bombas de calor cuya fuente energética es el calor geotérmico. Se justifica debido a que la disminución del rendimiento de la bomba de calor en función del aumento de la temperatura de condensación es independiente de la fuente de energía que utilice: aerotermia, geotermia o hidrotermia. Se han determinado nuevos factores que tienen en cuenta la posibilidad de utilización de valores de COP de equipos obtenidos para diferentes temperaturas de uso.
- c. Para las bombas de calor cuya fuente energética es la energía **Aerotérmica**:
 - i. Para el factor de ponderación (FP) se ha partido de los valores obtenidos; que se corresponden con el 15% de los casos más desfavorables. Estos valores se han corregido al alza para considerar las nuevas tecnologías en componentes y control incorporadas en los equipos nuevos, y que garantizan comportamientos a carga parcial sustancialmente mejores.

Las directrices de la Decisión (2013/114/UE) llaman la atención, en el apartado 3.3 “Rendimiento mínimo de las bombas de calor que debe considerarse como energía renovable según la directiva”, de forma explícita sobre el SPF de las bombas de calor aerotérmicas y en particular sobre aquellas que se empleen como calentadores de agua: “Los Estados miembros deben tener presente, en particular tratándose de bombas de calor con aire como fuente caliente, qué fracción de la potencia instalada de sus bombas de calor tiene un SPF superior al rendimiento mínimo. Para esa evaluación, los Estados miembros pueden basarse en datos de pruebas y mediciones, si bien, en muchos casos, ante la falta de datos, la evaluación se puede limitar a un dictamen pericial efectuado por cada Estado miembro. Los dictámenes periciales deben ser conservadores, es decir, se

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

debe tender a infraestimar más que a sobrestimar la contribución de las bombas de calor ⁽⁵⁾. Tratándose de calentadores de agua con aire como fuente caliente, solo en casos excepcionales tienen tales bombas de calor un SPF superior al umbral mínimo. Por otro lado **únicamente el aire ambiente**, es decir, el aire exterior, **puede ser la fuente energética de una bomba de calor con aire como fuente caliente**.

- ii. Se han simplificado las aplicaciones a dos casos: Equipos Centralizados (media de viviendas unifamiliares y en bloque) y Equipos tipo Split.
- d. Para las bombas de calor cuya fuente energética es la energía **Hidrotérmica**:
 - i. Se consideran los mismos valores del factor de ponderación (FP) que para la energía Geotérmica de Circuito Cerrado con intercambiadores horizontales minorados en un 5%.
- e. Para las bombas de calor cuya fuente energética es la energía **Geotérmica**:
 - i. Para el factor de ponderación (FP) se ha partido de los valores obtenidos; que se corresponden con el 15% de los casos más desfavorables. Estos valores se han corregido al alza para considerar las nuevas tecnologías en componentes y control incorporadas en los equipos nuevos, y que garantizan comportamientos a carga parcial sustancialmente mejores.

La tecnología geotérmica con bomba de calor asegura una mínima variación de la temperatura del terreno a lo largo de las horas del día, así como a lo largo de los días del año, e incluso a lo largo de los años de vida útil de la instalación; frente a

⁵Debe prestarse especial atención a las bombas de calor con aire como fuente caliente reversibles, debido a la existencia de posibles fuentes de sobrestimación, principalmente: a) no todas las bombas de calor reversibles se utilizan para calentar, o solo de manera limitada, y b) las unidades más antiguas (y las unidades nuevas menos eficientes) pueden tener una eficiencia (SPF) inferior al umbral mínimo exigido de 2,5.

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

la aerotermia que sufre de importantes variaciones diarias y estacionales además de su difícil predicción a lo largo de su vida útil.

- ii.* Se han simplificado las aplicaciones a dos casos: Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (media de viviendas unifamiliares y en bloque) y Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores horizontales.
 - iii.* Se ha considerado un nuevo caso: cuando la fuente de calor es energía Geotérmica de Circuito Abierto. Se consideran los mismos valores del factor de ponderación (FP) que para la Energía Geotérmica de circuito cerrado con intercambiadores verticales mayorados en un 5%.
- f. Se ha determinado un nuevo factor de corrección (FC) para la temperatura de distribución de 60 °C, que se corresponde con un valor de 0,55.
- g. Se han redondeado los factores a 2 decimales.

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

4. RESULTADOS

De esta forma los valores de los Factores son:

Tabla 4.1: Factor de ponderación (FP) para sistemas de Calefacción y/o ACS con bombas de caloren función de las fuentes energéticas, según la zona climática.

Fuente Energética de la bomba de calor	Factor de Ponderación (FP)				
	A	B	C	D	E
Energía Aerotérmica. Equipos centralizados	0,87	0,80	0,80	0,75	0,75
Energía Aerotérmica. Equipos individuales tipo split	0,66	0,68	0,68	0,64	0,64
Energía Hidrotérmica.	0,99	0,96	0,92	0,86	0,80
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores horizontales	1,05	1,01	0,97	0,90	0,85
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores verticales	1,24	1,23	1,18	1,11	1,03
Energía Geotérmica de circuito abierto	1,31	1,30	1,23	1,17	1,09

Tabla 4.2: Factores de corrección (FC) en función de las temperaturas de condensación, según la temperatura de ensayo del COP.

Factor de Corrección (FC)						
Tª de condensación (°C)	FC (COP a 35°C)	FC (COP a 40°C)	FC (COP a 45°C)	FC (COP a 50°C)	FC (COP a 55°C)	FC (COP a 60°C)
35	1,00	--	--	--	--	--
40	0,87	1,00	--	--	--	--
45	0,77	0,89	1,00	--	--	--
50	0,68	0,78	0,88	1,00	--	--
55	0,61	0,70	0,79	0,90	1,00	--
60	0,55	0,63	0,71	0,81	0,90	1,00

El valor del COP nominal de la bomba de calor será el obtenido de su ensayo, según la norma que les afecte (UNE-EN 14511: 2012, UNE-EN 15316: 2010, UNE-EN 16147, etc.) y obtenido para las condiciones de temperatura que correspondan a la zona climática en la que se instale y según la aplicación a la que abastezca.

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

En el caso de tratarse de **bombas de calor para producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) deberá considerarse 60 °C como temperatura de distribución**. Para temperaturas de preparación de ACS diferentes de 60 °C el volumen de acumulación de ACS de la bomba de calor deberá corresponder a la demanda obtenida para la temperatura elegida y se calculará a partir de las demandas de referencia a 60 °C de la sección HE4 del Código Técnico de la Edificación. En ningún caso la temperatura de preparación del ACS podrá ser inferior a 45 °C.

La demanda de ACS a considerar a efectos de cálculo del volumen de acumulación de ACS de la bomba de calor, según la temperatura elegida, será la que se obtenga a partir de la siguiente expresión:

$$D(T) = \sum_{i=1}^{12} D_i(T)$$

$$D_i(T) = D_i(60\text{ °C}) \times \left(\frac{60 - T_i}{T - T_i} \right)$$

- D(T) Demanda de agua caliente sanitaria anual a la temperatura T elegida;
- Di(T) Demanda de agua caliente sanitaria para el mes i a la temperatura T elegida;
- Di(60 °C) Demanda de agua caliente sanitaria para el mes i a la temperatura de 60 °C;
- T Temperatura del acumulador final;
- Ti Temperatura media del agua fría en el mes i (Norma UNE 94002:2005).

Así tendríamos:

$$SPF = COP_{nominal} \times FP \times FC$$

PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS

ANEXO I: COP MÍNIMO NECESARIO PARA CONSIDERACIÓN DE RENOVABLE

(Según aplicación y en función de la zona climática y la temperatura de distribución)

	COP mínimo para calefacción a 35°C				
<i>Fuente Energética de la bomba de calor</i>	A	B	C	D	E
Energía Aerotérmica Equipos centralizados	2,88	3,11	3,11	3,34	3,34
Energía Aerotérmica Equipos individuales tipo split	3,79	3,67	3,67	3,92	3,92
Energía Hidrotérmica	2,53	2,61	2,71	2,91	3,11
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores horizontales	2,39	2,47	2,58	2,77	2,95
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores verticales	2,01	2,03	2,12	2,25	2,42
Energía Geotérmica de circuito abierto	1,91	1,93	2,03	2,14	2,30
	COP mínimo para calefacción a 40°C				
<i>Fuente Energética de la bomba de calor</i>	A	B	C	D	E
Energía Aerotérmica Equipos centralizados	3,31	3,58	3,58	3,84	3,84
Energía Aerotérmica Equipos individuales tipo split	4,35	4,21	4,21	4,50	4,50
Energía Hidrotérmica	2,90	3,00	3,11	3,35	3,58
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores horizontales	2,75	2,84	2,97	3,19	3,39
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores verticales	2,31	2,33	2,44	2,59	2,78
Energía Geotérmica de circuito abierto	2,20	2,21	2,33	2,46	2,64
	COP mínimo para calefacción a 45°C				
<i>Fuente Energética de la bomba de calor</i>	A	B	C	D	E
Energía Aerotérmica Equipos centralizados	3,74	4,04	4,04	4,34	4,34
Energía Aerotérmica Equipos individuales tipo split	4,92	4,76	4,76	5,09	5,09
Energía Hidrotérmica	3,28	3,39	3,51	3,78	4,04
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores horizontales	3,11	3,21	3,35	3,60	3,83
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores verticales	2,61	2,64	2,76	2,92	3,14
Energía Geotérmica de circuito abierto	2,48	2,50	2,64	2,78	2,98

**PRESTACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE LAS BOMBAS DE CALOR
PARA PRODUCCIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS**

	COP mínimo para calefacción a 50°C				
<i>Fuente Energética de la bomba de calor</i>	A	B	C	D	E
Energía Aerotérmica Equipos centralizados	4,23	4,58	4,58	4,92	4,92
Energía Aerotérmica Equipos individuales tipo split	5,57	5,39	5,39	5,76	5,76
Energía Hidrotérmica	3,71	3,84	3,98	4,28	4,58
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores horizontales	3,52	3,63	3,80	4,08	4,34
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores verticales	2,96	2,98	3,12	3,31	3,56
Energía Geotérmica de circuito abierto	2,81	2,83	2,98	3,15	3,38
	COP mínimo para calefacción a 55°C				
<i>Fuente Energética de la bomba de calor</i>	A	B	C	D	E
Energía Aerotérmica Equipos centralizados	4,72	5,10	5,10	5,48	5,48
Energía Aerotérmica Equipos individuales tipo split	6,21	6,01	6,01	6,42	6,42
Energía Hidrotérmica	4,14	4,28	4,44	4,78	5,10
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores horizontales	3,92	4,05	4,23	4,54	4,84
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores verticales	3,30	3,33	3,48	3,69	3,96
Energía Geotérmica de circuito abierto	3,13	3,16	3,33	3,51	3,76
	COP mínimo para calefacción y/o ACS a 60°C				
<i>Fuente Energética de la bomba de calor</i>	A	B	C	D	E
Energía Aerotérmica Equipos centralizados	5,23	5,66	5,66	6,08	6,08
Energía Aerotérmica Equipos individuales tipo split	6,89	6,66	6,66	7,12	7,12
Energía Hidrotérmica	4,59	4,75	4,92	5,30	5,66
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores horizontales	4,35	4,49	4,70	5,04	5,37
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores verticales	3,66	3,69	3,86	4,09	4,40
Energía Geotérmica de circuito abierto	3,47	3,50	3,69	3,90	4,17