



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO Y FINANCIERO DE UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Jorge Monzón García

Director: David Trebolle Trebolle

Madrid

Junio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Análisis Técnico-Económico y Financiero de un proyecto de eficiencia energética en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2024/2025 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Jorge Monzón García

Fecha: 23/06/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

TREBOLLE
TREBOLLE
DAVID -
05207260Z

Firmado
digitalmente por
TREBOLLE
TREBOLLE DAVID -
05207260Z
Fecha: 2025.06.23
12:30:30 +02'00'

Fdo.: David Trebolle Trebolle

Fecha: 23/ 06/ 2025

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO Y FINANCIERO DE UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Monzón García, Jorge.

Director: Trebolle Trebolle, David.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo de Fin de Grado presenta un análisis técnico-económico de un proyecto de eficiencia energética aplicado a una vivienda unifamiliar en Madrid. Se han evaluado medidas activas y pasivas para reducir el consumo energético (alineado con los ODS), destacando la incorporación de tecnologías de autoconsumo como la solar fotovoltaica y el uso de vehículos híbridos enchufables con tecnología V2H. Los resultados muestran una disminución significativa del consumo y un retorno económico viable.

Palabras clave: eficiencia energética, autoconsumo, transición energética, ahorro energético.

1. Introducción

El aumento del consumo energético residencial y la necesidad de transición hacia un modelo sostenible han motivado el desarrollo de soluciones basadas en la eficiencia energética. Este trabajo se centra en la aplicación de dichas soluciones a una vivienda unifamiliar ubicada en Madrid, con el objetivo de reducir tanto el consumo térmico como eléctrico mediante el análisis técnico, económico y financiero de distintas medidas.

2. Definición del proyecto

El proyecto consiste en estudiar y aplicar un conjunto de mejoras en una vivienda real, considerando medidas en el lado de la demanda (como la sustitución de electrodomésticos o mejoras en el aislamiento) y en el lado del suministro (instalación fotovoltaica, vehículo híbrido enchufable con tecnología V2H). Se establecen criterios de selección de medidas mediante indicadores de rentabilidad como el VAN, la TIR o el Payback.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para la evaluación de las medidas propuestas se han realizado estimaciones razonadas a partir de datos reales de consumo energético de la vivienda, combinados con estudios técnicos, catálogos de fabricantes y herramientas como Excel. Se ha calculado el consumo energético previo a la intervención, y se han proyectado los posibles ahorros asociados a cada medida mediante comparativas con tecnologías más eficientes. A partir de estas estimaciones, se ha hecho un análisis económico detallado que incluye costes de inversión, mantenimiento, vida útil de los sistemas y retorno económico, empleando indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación (Payback).



Figura 1. Esquema general del proyecto de eficiencia energética.

4. Resultados

El análisis técnico-económico realizado ha permitido cuantificar de forma precisa el impacto de las medidas de eficiencia energética seleccionadas. La vivienda partía de un consumo

energético total anual de 77785,6 kWh, distribuidos en 25605,6 kWh eléctricos y 52180 kWh térmicos, con un coste energético de 6938,57 € anuales.

Tras aplicar las medidas consideradas viables, se ha conseguido una reducción del consumo energético del 45,4 %, lo que supone un ahorro energético anual de 35547,21 kWh. Esto se ha traducido en una reducción del gasto energético del 39,9 %, disminuyendo la factura anual hasta los 4172,40 €, con un ahorro económico neto de 2766,2 € anuales.

En términos de rentabilidad, el escenario óptimo contempla una inversión mínima de 2317 € por parte del propietario, obteniendo un Valor Actual Neto del equity (VANE) de 12310,1€ y una Tasa Interna de Retorno (TIRE) del equity del 70,27 %, lo que demuestra una rentabilidad altamente positiva. Además, las medidas implementadas no solo mejoran la eficiencia energética de la vivienda, sino que permiten aprovechar el potencial de tecnologías innovadoras como el autoconsumo fotovoltaico y el uso bidireccional de la batería de vehículos híbridos enchufables (V2H).

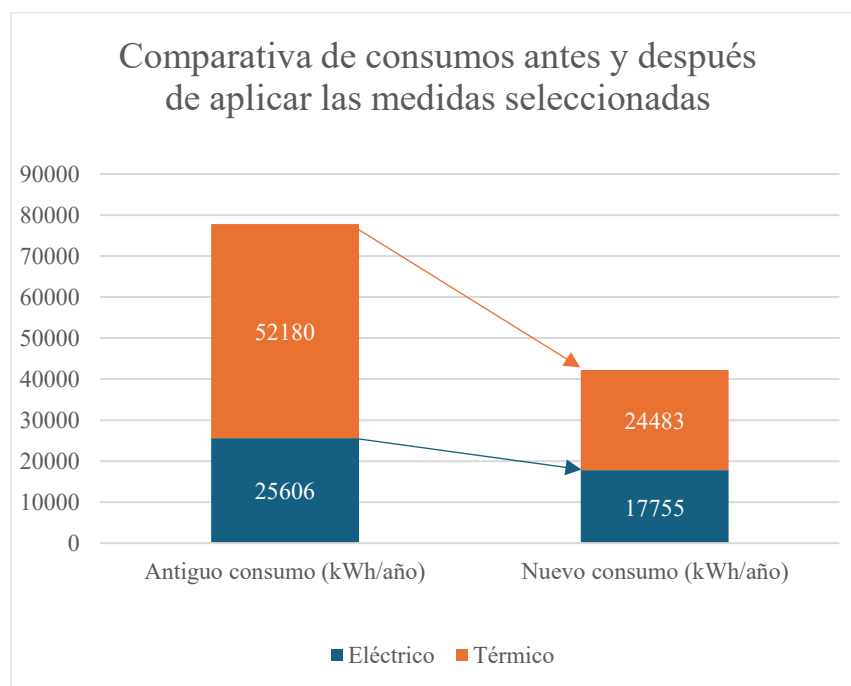


Figura 2. Ahorro energético anual estimado con las medidas seleccionadas.

5. Conclusiones

El proyecto ha demostrado que aplicar medidas de eficiencia energética en una vivienda unifamiliar permite obtener ahorros significativos tanto en consumo como en coste. Se ha logrado reducir el consumo energético un 45,4 % y el gasto anual un 39,9 %, con una inversión mínima que ofrece una TIR del 70,27 % y un VAN positivo de 12310,1€.

Además del beneficio económico, la incorporación de tecnologías como el autoconsumo fotovoltaico y el V2H mejora la sostenibilidad y autonomía energética de la vivienda. En conjunto, el estudio valida la viabilidad técnica y financiera de este tipo de intervenciones y su potencial de replicabilidad en el ámbito residencial.

TECHNICAL, ECONOMIC AND FINANCIAL ANALYSIS OF AN ENERGY EFFICIENCY PROJECT

Author: Monzón García, Jorge

Supervisor: Trebolle Trebolle, David

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This Final Degree Project presents a technical and economic analysis of an energy efficiency project applied to a single-family home in Madrid. Both active and passive measures have been evaluated to reduce energy consumption (in line with the SDGs), with special focus on self-consumption technologies such as solar PV systems and the use of plug-in hybrid vehicles with V2H (Vehicle-to-Home) technology. The results show a significant reduction in energy use and a viable economic return.

Keywords: energy efficiency, self-consumption, energy transition, energy savings

1. Introduction

The rise in residential energy consumption and the need to transition towards a more sustainable model have driven the development of solutions based on energy efficiency. This project focuses on applying those solutions to a single-family home in Madrid, with the goal of reducing both thermal and electrical consumption through a technical, economic, and financial analysis of different improvement measures.

2. Project Definition

The project studies and proposes a set of improvements for a real home, including both demand-side measures (such as replacing appliances or improving insulation) and supply-side measures (such as installing solar panels or using a plug-in hybrid vehicle with V2H technology). Selection criteria for each measure are based on profitability indicators like Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period.

3. Description of the Model/System/Tool

To evaluate the proposed measures, reasoned estimates were made using real energy consumption data from the home, technical studies, manufacturer catalogs, and tools such as Excel. The pre-intervention energy consumption was calculated, and potential savings were estimated by comparing with more efficient technologies. Based on these estimates, a detailed economic analysis was carried out, considering investment costs, maintenance, system lifespan, and financial return, using indicators like Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period.

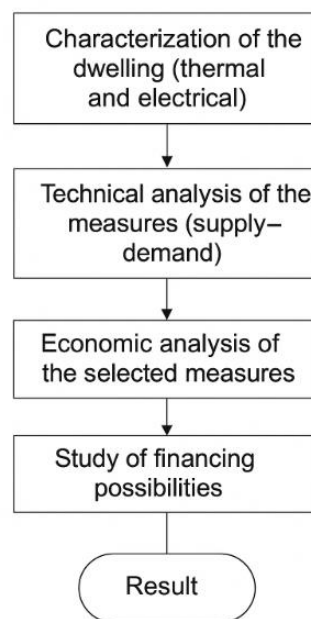


Figure 1. General diagram of the energy efficiency project.

4. Results

The technical and economic analysis made it possible to precisely quantify the impact of the selected energy efficiency measures. The home initially had a total annual energy consumption of 77785,6 kWh, including 25605,6 kWh of electricity and 52180 kWh of thermal energy, with an annual energy cost of 6938,57€.

After applying the selected measures, energy consumption was reduced by 45,4 %, saving 35547,21 kWh per year. This led to a 39,9 % reduction in annual energy costs, lowering the bill to 4172,40€, and achieving a net annual savings of 2766,20€.

In terms of profitability, the optimal scenario required a minimum personal investment of 2317€, yielding an equity NPV of 12310,10€ and an equity IRR of 70,27 %, showing a highly positive financial return. In addition to the economic benefits, the implemented measures improve the home's energy efficiency and make use of innovative technologies such as solar self-consumption and bidirectional charging through V2H.

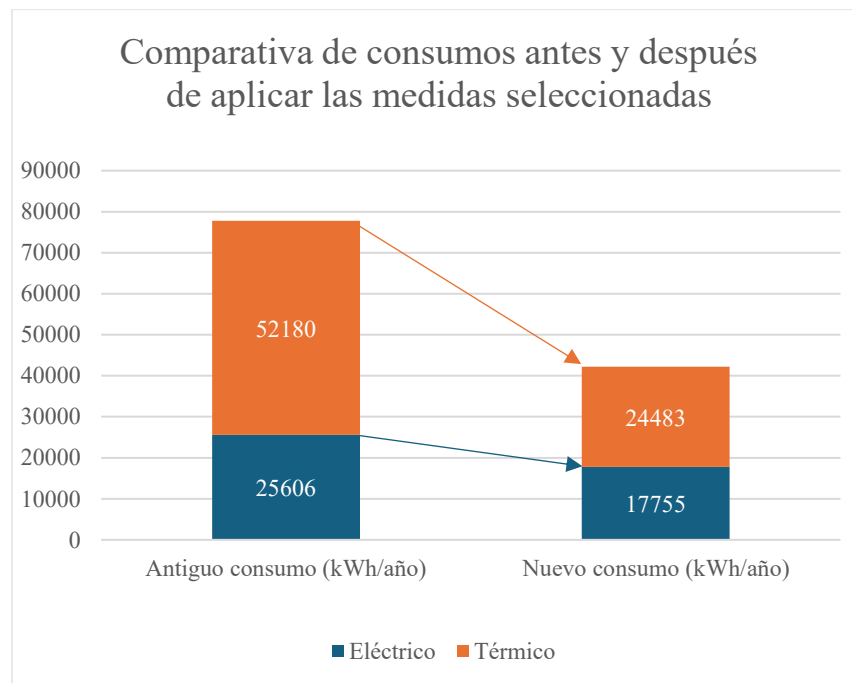


Figure 2. Estimated annual energy savings with the selected measures.

5. Conclusions

The project has shown that applying energy efficiency measures in a single-family home can result in significant reductions in both energy use and cost. A 45,4 % cut in energy consumption and a 39,9 % drop in annual energy expenses were achieved, with a minimal investment that delivered a 70,27 % IRR and a positive NPV of 12310,10€.

Beyond the economic benefits, the integration of technologies like solar self-consumption and V2H contributes to greater sustainability and energy independence for the household. Overall, the study confirms the technical and financial feasibility of these interventions and their potential to be replicated in similar residential settings.

ÍNDICE:

1.	Introducción	14
1.1	Consumo y eficiencia energética en el sector residencial	17
1.2	Motivación	20
1.3	Objetivos	21
1.4	Metodología	22
2.	Caracterización de la vivienda	25
2.1	Características energéticas de la vivienda	29
2.2	Caracterización de la demanda.....	29
2.2.1	Caracterización de la demanda térmica.....	29
2.2.2	Caracterización de la demanda eléctrica	37
2.2.3	Caracterización de la demanda energética total	42
2.3	Caracterización de los consumos de la vivienda	44
2.3.1	Caracterización de los consumos eléctricos	44
2.3.2	Caracterización de los consumos térmicos.....	45
2.3.3	Caracterización de los consumos energéticos totales	46
2.4	Caracterización del gasto en energía	47
2.4.1	Factura de gas.....	47
2.4.2	Factura de electricidad	49
2.4.3	Resumen de las facturas de la vivienda.....	51
3.	Análisis técnico de medidas de ahorro y eficiencia energética	53
3.1	Introducción	53
3.2	Medidas en el lado de la demanda y ahorros energéticos asociados	56
3.2.1	Medidas en el lado de la demanda eléctrica	58
3.2.2	Medidas en el lado de la demanda térmica.....	68
3.3	Medidas en el lado del suministro y ahorros energéticos asociados	86
3.3.1	Medidas en el lado del suministro eléctrico	87
3.3.2	Medidas en el lado del suministro térmico.....	97
3.4	Análisis de factibilidad de las alternativas	102
4.	Análisis económico-financiero de las alternativas	106
4.1	Introducción	107
4.2	Cálculo de ahorros y Payback	109
4.2.1	Análisis económico del cambio de bombillas	110
4.2.2	Análisis económico del cambio de electrodomésticos	112

4.2.3	Análisis económico de la implantación de sistemas de control y automatización en el hogar.....	113
4.2.4	Análisis económico de la sustitución de ventanas.....	114
4.2.5	Análisis económico de la zonificación mediante domótica.....	115
4.2.6	Análisis económico de la mejora del aislamiento térmico de la envolvente	117
4.2.7	Análisis económico de la instalación de placas fotovoltaicas	118
4.2.8	Análisis económico de la implementación de tecnología V2H	120
4.2.9	Análisis económico del cambio de caldera.....	123
4.2.10	Análisis económico de la instalación de colectores solares.....	124
4.3	Análisis de viabilidad económica de las medidas y su selección	125
4.4	Cálculo de los ahorros asociados a las medidas seleccionadas	131
4.5	Financiación de las medidas.....	134
4.5.1	Alternativas financieras disponibles.....	139
5.	Resumen y conclusiones	149
6.	Referencias bibliográficas	158

1. Introducción

España tiene como objetivo transformar el modelo energético actual hacia uno más sostenible y descarbonizado, para poder así cumplir con los compromisos internacionales que tienen todos los países para combatir el cambio climático. Estos compromisos que ha asumido España tanto con la Unión Europea como con el resto de países del mundo vienen principalmente recogidos en el Acuerdo de París, adoptado en el 2015. Es en este Acuerdo donde se destaca la importancia de contener el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2°C. Para ello, en España, el 20 de mayo de 2021 se tuvo que aprobar una ley llamada Ley de Cambio Climático y Transición Energética [1]. Es este marco legal el que se va a encargar de conseguir los objetivos a los que se ha comprometido España en unos plazos ya acordados. Algunos de los puntos clave que recoge esta ley serían:

- La descarbonización de la economía española, lo que incluye la generación de energía y su consumo. El fin de esta medida es llegar a tener una economía sin huella de carbono.
- Se fija como meta que la penetración de las energías renovables en el consumo final energético sea del 42% para el año 2030.
- Se busca mejorar la eficiencia energética disminuyendo el consumo de energía primaria en un 39,5%.
- España deberá alcanzar la neutralidad climática, lo que viene a significar que el sistema eléctrico español esté basado exclusivamente en fuentes de generación de origen renovable. Esta medida tiene que estar implementada antes del 2050.
- Se prohibirá la apertura de nuevas explotaciones de extracción de hidrocarburos en España, tanto en tierra como en mar.

Además de estas medidas respaldadas por dicha Ley, la Agencia Internacional de Energía (AIE) resaltó que mejorar la eficiencia energética es un elemento clave que debe estar presente en cualquier escenario viable para mantener el límite de los dos grados de calentamiento global [2]. Desde una perspectiva económica, la AIE proyecta que, para el año 2035, casi la mitad de todas las inversiones en el sector energético a nivel mundial deberán destinarse a la eficiencia energética con el fin de alcanzar los objetivos ambientales. En respuesta a esto, la Comisión Europea ha definido la eficiencia energética como el método

más eficaz para reforzar la seguridad en el suministro, disminuir las emisiones de carbono, fortalecer la competitividad y fomentar el crecimiento de mercados enfocados en tecnologías más eficientes en el uso de energía [3].

Debido a todo lo arriba expuesto, parece evidente la necesidad fundamental de que todos los sectores económicos y sociales contribuyan para poder llegar a alcanzar estos objetivos. La transición hacia un modelo energético sostenible no solo implica una mayor implantación de fuentes de energía renovables, sino también la optimización en el uso de la energía, fomentando medidas de ahorro y eficiencia energética tanto en la demanda como en el suministro. Es por ello, que la mejora de la eficiencia energética no solo es un requisito para reducir la contaminación que produce el cambio climático, sino también una opción que se tiene para disminuir los costes energéticos y promover la competitividad empresarial. El mejor aprovechamiento de la energía resulta clave en sectores como el residencial, industrial y de servicios, donde la implementación de tecnologías y prácticas más eficientes puede generar importantes beneficios tanto económicos como sostenibles.

El primer paso antes de ponerse a clasificar y medir la eficiencia energética es fundamental definir con precisión este término, ya que a menudo se confunde con el concepto de la conservación de la energía. Además, es importante establecer indicadores específicos para cada país que permitan medir la eficiencia energética que tienen de manera adecuada.

La eficiencia energética consiste en utilizar la energía de manera óptima para mejorar los procesos productivos, permitiendo generar más bienes o servicios con igual o menor consumo energético. A diferencia de esto, la conservación de la energía está relacionada con los hábitos de las personas, ya que implica reducir el consumo mediante cambios en el comportamiento, como apagar luces innecesarias, mientras que la eficiencia energética se enfoca en mejoras tecnológicas, como el uso de bombillas de bajo consumo. Sin embargo, la verdadera eficiencia depende tanto de la tecnología como de la actitud de los consumidores, ya que los avances pueden verse contrarrestados por un uso ineficiente. Por ejemplo, si un hogar adopta electrodomésticos eficientes, pero incrementa su uso, el ahorro energético logrado puede desaparecer. Esto demuestra que, para cerrar la brecha entre el potencial y la eficiencia real, es necesario combinar innovación con un cambio en los hábitos de consumo.

El potencial de la eficiencia energética no se limita a un solo ámbito, sino que abarca distintos sectores clave como el industrial, el comercial y el residencial. El sector industrial, que representa aproximadamente el 23% del consumo energético final en España [4], tiene un amplio margen de mejora mediante la optimización de procesos productivos. Medidas como la recuperación de calor residual, la modernización de maquinaria y la implementación de sistemas de gestión energética pueden contribuir significativamente a la reducción del consumo.

Por otro lado, el sector terciario, que engloba actividades comerciales y de servicios, supone en torno al 13% del consumo energético nacional. La eficiencia en este ámbito puede lograrse a través de la modernización de sistemas de iluminación, la climatización eficiente y la automatización de edificios.

La eficiencia energética en el sector residencial es un tema de creciente importancia, ya que se estima que una parte significativa del consumo de energía en los hogares podría evitarse mediante la adopción de comportamientos eficientes y medidas de conservación. Por ejemplo, prácticas como apagar luces innecesarias o utilizar electrodomésticos de bajo consumo pueden contribuir sustancialmente a la reducción del consumo energético. Sin embargo, para lograr una mejora efectiva en la eficiencia energética de los hogares, no solo es esencial implementar avances tecnológicos, sino también fomentar que los consumidores adopten y mantengan dichos hábitos eficientes. Diversos estudios han demostrado que cuando se proporciona información clara sobre la eficiencia de los equipos, los usuarios tienden a elegir tecnologías más eficientes, especialmente en los que existe una relación directa entre el ahorro energético y el económico.

Al evaluar la eficiencia energética de un país, es crucial considerar numerosos factores como las condiciones geográficas, la estructura económica, políticas energéticas y regulaciones y las costumbres y hábitos de consumo. Todos estos factores y otros tantos que vienen intrínsecos en cada sector influyen, y mucho, en dicha estimación. A menudo, estos factores no se consideran en los balances energéticos, lo que complica el ejercicio de realizar estimaciones precisas de eficiencia energética por país.

1.1 Consumo y eficiencia energética en el sector residencial

El sector residencial juega un papel clave en el consumo energético de España, representando una proporción muy significativa del consumo final energético del país. La transición hacia un modelo energético más eficiente y sostenible es fundamental para reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida de la población. De acuerdo con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima PNIEC, el consumo de energía en los hogares ha evolucionado en los últimos años debido a múltiples factores, como el crecimiento urbano, la modernización de la estructura de las viviendas, el auge de las energías renovables y la implementación de políticas de eficiencia energética.

En este apartado se analizará la evolución del consumo energético en el sector residencial, sus principales fuentes de energía, las medidas de eficiencia implementadas y los objetivos de ahorro energético establecidos en el marco del PNIEC.

El consumo de energía en el sector residencial español ha mostrado una tendencia a la baja en los últimos años debido a las mejoras en eficiencia energética y el aumento de la concienciación sobre el uso racional de la energía. En el año 2023, el consumo final de energía en este sector fue de 14283 ktep (kilotoneladas equivalentes de petróleo), mientras que las previsiones para 2030 apuntan a una reducción hasta 12609 ktep, lo que representa una disminución del 11,7% en una década [5]. Para dicho año, el PNIEC establece un ahorro acumulado de 7323,6 ktep en el sector residencial, lo que representa el 14% del total de ahorro de energía final del país.

El consumo de energía en los hogares proviene de diversas fuentes, y en los últimos años ha habido una clara tendencia hacia el uso de energías limpias y una progresiva reducción de la dependencia de combustibles fósiles. Este cambio responde tanto a la necesidad de descarbonizar el sector residencial como a los compromisos adquiridos por España en el marco del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y las políticas energéticas de la Unión Europea.

Uno de los cambios más importantes en materia energética de los hogares españoles ha sido la práctica eliminación del carbón como fuente de energía doméstica. Históricamente utilizado para calefacción en ciertas zonas, su uso ha desaparecido debido a su alto impacto ambiental y a la implementación de normativas que restringen su comercialización y

consumo. Además, el consumo de productos derivados del petróleo y el gas natural en los hogares ha disminuido de manera significativa. Esto se debe a varios factores, entre ellos, la creación de sistemas de calefacción y agua caliente más eficientes, la mejora en el aislamiento térmico de los edificios y el incremento del precio de los combustibles fósiles.

Por otra parte, la descarbonización del sector residencial es una tendencia clave en la transición energética de España. Se espera que su participación en el consumo de los hogares siga aumentando en los próximos años, gracias a diversas iniciativas que impulsan, por ejemplo, el uso de paneles fotovoltaicos, redes de calor y frío renovables y el uso de bombas de calor.

Relacionado con esto, se ha promovido el uso de biomasa y energía solar térmica como alternativas sostenibles para calefacción y agua caliente sanitaria en el sector residencial. La biomasa, en forma de palets o astillas de madera, está siendo una opción cada vez más utilizada en áreas rurales y en viviendas unifamiliares, debido a su bajo impacto ambiental y su coste competitivo en comparación con el gas y la electricidad. Por su parte, la energía solar térmica ha recibido un fuerte impulso en edificios de nueva construcción y en rehabilitaciones energéticas. Esta tecnología permite aprovechar la radiación solar para generar agua caliente sanitaria, reduciendo la necesidad de combustibles convencionales. En muchas comunidades autónomas, su instalación es obligatoria en edificios nuevos, de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación [6].

A medida que el sector residencial avanza hacia un modelo energético más sostenible, es fundamental analizar cómo se distribuye el consumo de energía dentro de los hogares españoles. La eficiencia energética no solo depende de la fuente de energía utilizada, sino también de cómo se emplea en las distintas actividades diarias. En este sentido, la calefacción y el agua caliente sanitaria representan los mayores consumos, lo que ha llevado a priorizar políticas de rehabilitación de edificios y la adopción de sistemas de climatización más eficientes. A continuación, se presenta una gráfica que muestra la distribución del consumo energético por usos en los hogares españoles, resaltando los sectores clave donde las mejoras en eficiencia pueden generar un mayor impacto.

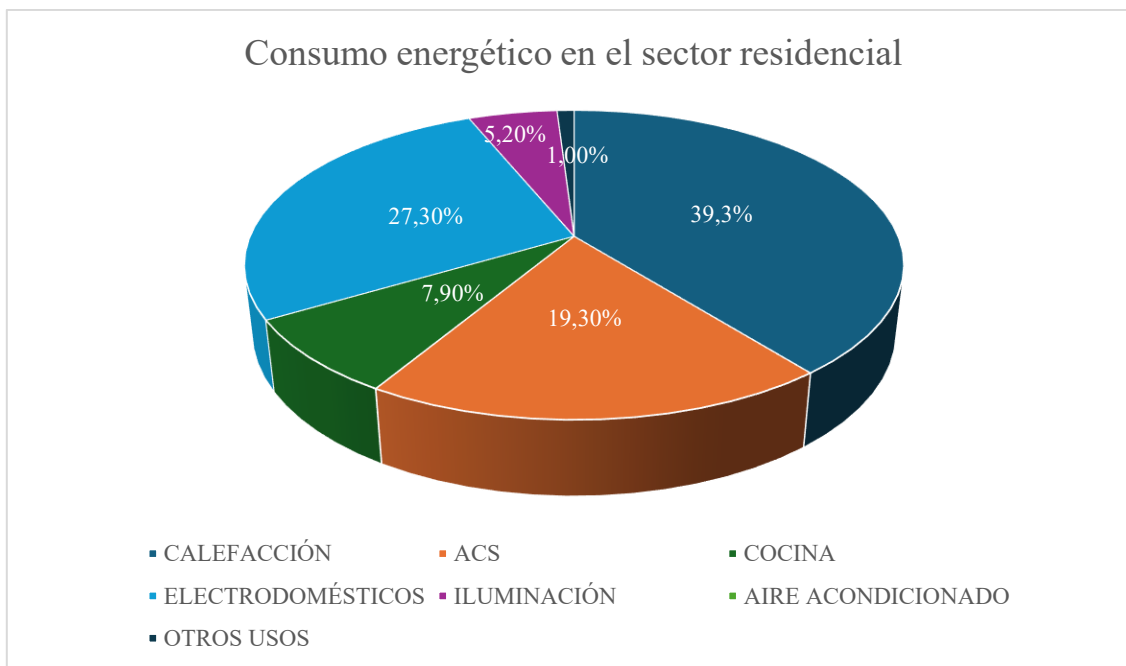


Figura 1: Distribución del uso final de la energía en el sector residencial

Datos fuente: [7].

En conclusión, el consumo energético en el sector residencial español está altamente concentrado en áreas clave como calefacción, agua caliente sanitaria y electrodomésticos, que representan juntos una parte significativa del total. La calefacción, con un 39,3%, es la principal fuente de consumo, seguida por el agua caliente sanitaria (19,3%) y los electrodomésticos (27,3%). Esta distribución resalta la importancia de enfocar las políticas de eficiencia energética en estos sectores para maximizar los ahorros y reducir el impacto ambiental. Cabe destacar que los consumos térmicos son muy superiores a los eléctricos, por lo que, de cara a implantar las medidas de eficiencia energética, estos consumos son donde más rentables pueden ser.

En este contexto, el proyecto de eficiencia energética que se realizará en este trabajo es esencial, ya que ofrece soluciones técnicas y económicas que pueden optimizar el uso de la energía en estos ámbitos clave. Además, contribuye al cumplimiento de los objetivos del PNIEC, no solo en términos de ahorro energético, sino también en la mejora de la sostenibilidad y la competitividad del sector residencial en España.

1.2 Motivación

El aumento de la eficiencia energética es una de las prioridades de la Unión Europea para lograr una economía más sostenible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este objetivo se enmarca en el Pacto Verde Europeo (Green Deal) [8], que busca transformar la UE en una región climáticamente neutra para 2050. Para alcanzar este objetivo, la UE ha propuesto una serie de políticas y estrategias, como el paquete de medidas "Fit for 55", que tiene como meta reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% para 2030, en comparación con los niveles de 1990 [9]. Parte de estas medidas incluyen la mejora de la eficiencia energética en sectores clave como la edificación, el transporte, la industria y los sistemas de energía. No obstante, muchas de las soluciones propuestas, aunque resulten rentables en términos de consumo energético, no se llevan a cabo. Este fenómeno da lugar a lo que se conoce como la brecha de eficiencia energética, que hace referencia a la diferencia entre la eficiencia energética idealmente alcanzable y la que realmente se implementa.

Uno de los sectores más afectados por la deficiencia en eficiencia energética es el residencial. Sin embargo, lo que resulta más relevante no es solo la implementación de medidas para mejorar la eficiencia, sino el rápido ritmo de crecimiento urbano. Este fenómeno genera una creciente preocupación por optimizar la planificación, el diseño, la construcción y el mantenimiento de los procesos relacionados con la eficiencia energética en los edificios, con el fin de lograr un desarrollo urbano sostenible. Y es en este sector residencial donde mayor margen de mejora existe en términos de eficiencia energética, ya que solo un 5,6% de las viviendas españolas cuentan con calificaciones energéticas A, B o C; lo que implica que aproximadamente el 94,4% de los hogares están clasificados como ineficientes desde el punto de vista energético [10].

El uso de medidas de eficiencia energética ofrece múltiples ventajas, tanto en el lado de la demanda como en el suministro. La adopción de medidas de eficiencia energética ofrece diversas ventajas tanto en el lado de la demanda como del suministro (demand-side, supply-side). En términos de suministro, la optimización de los sistemas de calefacción, refrigeración y producción de agua caliente sanitaria permite un uso más eficiente de la energía, reduciendo costes y emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la mejora en el aislamiento térmico y el uso de tecnologías más eficientes en la climatización pueden minimizar las

pérdidas energéticas y mejorar la habitabilidad en las viviendas. En cuanto a la demanda, la implementación de electrodomésticos eficientes y sistemas de iluminación de bajo consumo llevan a una gran reducción en el consumo de electricidad y gas, y eso implica un ahorro bastante considerable para los residentes.

Con relación a esto, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030 establece una serie de medidas dirigidas a la mejora de la eficiencia energética en edificios, alineándose con la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios de la Unión Europea [11]. Entre sus objetivos, se encuentra la rehabilitación de viviendas para mejorar su eficiencia, la incorporación de sistemas de energías renovables y la reducción del consumo de energía primaria en un 39,5% para 2030. Gracias al uso de distintas medidas de eficiencia energética, se podría lograr una reducción del consumo de energía de hasta un 30% sin necesidad de realizar considerables modificaciones en la estructura de los edificios [12].

La importancia de este trabajo se encuentra en las múltiples ventajas que ofrece, tanto económicas como sociales y productivas. El sector residencial representa una parte significativa del consumo energético en España y, como se ha comentado anteriormente, presenta grandes deficiencias en eficiencia energética, lo que conlleva mayores costes para los hogares y dejar una mayor huella de carbono. La selección de una vivienda unifamiliar responde a la necesidad de evaluar medidas aplicables a nivel residencial, donde el potencial de ahorro energético es alto sin necesidad de grandes inversiones tanto estructurales como en capital. Además, este trabajo busca proporcionar información importante a los consumidores, para poder así reducir su gasto energético y mejorar la comodidad en sus hogares.

1.3 Objetivos

Los objetivos propuestos en este proyecto son principalmente cinco:

1. La caracterización energética de un inmueble. Se escogerá un inmueble sobre el que se va a realizar un estudio de sus consumos energéticos (eléctrico y térmico) a partir de la información disponible.
2. Análisis técnico de medidas de ahorro y eficiencia energética, tanto en el lado de la demanda como en el del suministro. A través de los datos extraídos del inmueble en

cuestión, estudio hecho en el anterior objetivo. Esto tiene como objeto la búsqueda de un mayor aprovechamiento de la energía demandada.

3. Análisis de los ahorros económicos asociados a dichas medidas. Una vez se tengan las propuestas, tanto en la parte de la demanda como en la del suministro, se cuantificarán los ahorros producidos en caso de implementar los cambios.
4. Estudio de la viabilidad económica de todas las medidas, para poder así seleccionar las más rentables. A partir de distintas herramientas financieras (VAN, PayBack, ...), se estudiará en profundidad la viabilidad de aplicar cada una de las medidas de eficiencia energética estudiadas anteriormente.
5. Estudio de las distintas opciones de financiación. Se comprobarán todas las diferentes posibilidades de financiación del proyecto de eficiencia energética, estudiando si se pudiesen obtener tanto ayudas de carácter público como privado.

1.4 Metodología

La metodología empleada en este trabajo se basa en un enfoque secuencial, estructurado y cuantitativo, dividido en tres grandes bloques: caracterización energética de la vivienda, análisis técnico de las medidas y análisis económico-financiero. Cada bloque genera unos indicadores clave (KPIs) que sirven como entrada para el siguiente

1. Caracterización energética de la vivienda

En esta primera fase se ha realizado un estudio detallado del estado actual de la vivienda. Se han recopilado planos, datos constructivos, y observaciones del equipamiento existente, con especial atención a los sistemas de climatización y producción de ACS. También se ha considerado la factura energética de gas natural y el historial de consumos eléctricos.

A partir de esta información, se ha llevado a cabo una caracterización de las demandas y consumos energéticos dividida en dos partes: térmica y eléctrica. El resultado de esta fase ha sido la obtención de los consumos anuales de referencia, que constituyen la base comparativa para evaluar el impacto de las medidas de mejora.

2. Análisis técnico de las medidas

Una vez establecida la situación de partida, se han identificado y seleccionado una serie de medidas de eficiencia energética, atendiendo a la lógica de la pirámide de eficiencia energética. Las medidas se han clasificado en dos bloques:

- Demand-side: actuaciones sobre la demanda (mejora de aislamiento, sustitución de electrodomésticos, cambio de ventanas, etc.).
- Supply-side: actuaciones sobre el suministro (aerotermia, instalación fotovoltaica, baterías, etc.).

Para cada medida se ha estimado su impacto energético mediante una nueva caracterización de la vivienda tras su implementación, calculando los ahorros energéticos esperados respecto al estado inicial. Este análisis ha permitido determinar el rendimiento técnico de cada propuesta de forma independiente.

3. Análisis económico-financiero

Con los resultados del análisis técnico, se ha procedido a realizar un estudio económico para cada medida. Se han calculado los ahorros económicos anuales esperados, los costes de inversión, y los principales indicadores de viabilidad financiera:

- Valor Actual Neto (VAN)
- Tasa interna de retorno (TIR)
- Periodo simple de retorno (Payback)

A partir de estos indicadores, se ha determinado la viabilidad económica de cada medida individual. Aquellas con resultados positivos han sido seleccionadas para su inclusión en un proyecto conjunto.

Sobre esta agrupación de medidas viables, se ha repetido el análisis económico-financiero considerando los efectos acumulados y posibles sinergias. Este enfoque ha permitido determinar la viabilidad económica del proyecto combinado, así como identificar la forma de financiación óptima, teniendo en cuenta las opciones disponibles y posibles incentivos o subvenciones.

El proceso concluye con la formulación de un resumen y conclusiones, recogiendo los resultados más relevantes del análisis integrado.



2. Caracterización de la vivienda

El edificio a estudiar se trata de una vivienda unifamiliar construida en el año 2008, situada en la comunidad de Madrid, en concreto, en el distrito de Hortaleza. Para contextualizar dicho inmueble, se mostrará tanto una vista aérea como una fotografía de la vivienda.



Figura 2: Fotografía de la vivienda unifamiliar a estudiar.

En la figura 2 se puede observar el inmueble objeto de estudio, se trata de una vivienda unifamiliar pareada de seis plantas, dos bajo rasante y cuatro sobre la misma. Las plantas se dividen de la siguiente manera:

- Un sótano de $178,3 \text{ m}^2$
- Una planta garaje de $144,32 \text{ m}^2$
- La planta baja con $95,34 \text{ m}^2$
- La primera planta tiene $101,84 \text{ m}^2$
- La segunda planta $49,32 \text{ m}^2$

- La terraza que cuenta con $64,57 \text{ m}^2$

La superficie (terreno) donde se encuentra la casa es de $384,21 \text{ m}^2$, y la superficie habitable es de 380 m^2 .

Como se ha comentado arriba, la vivienda es pareada, colindando con la vivienda adyacente en la fachada Sur de la misma. Esto implica que más adelante, no se considerará la ganancia solar de dicha fachada. Por otra parte, las fachadas Norte, Este y Oeste están expuestas directamente a la luz solar. La figura 3 muestra una vista aérea para poder observar correctamente la orientación de la vivienda.

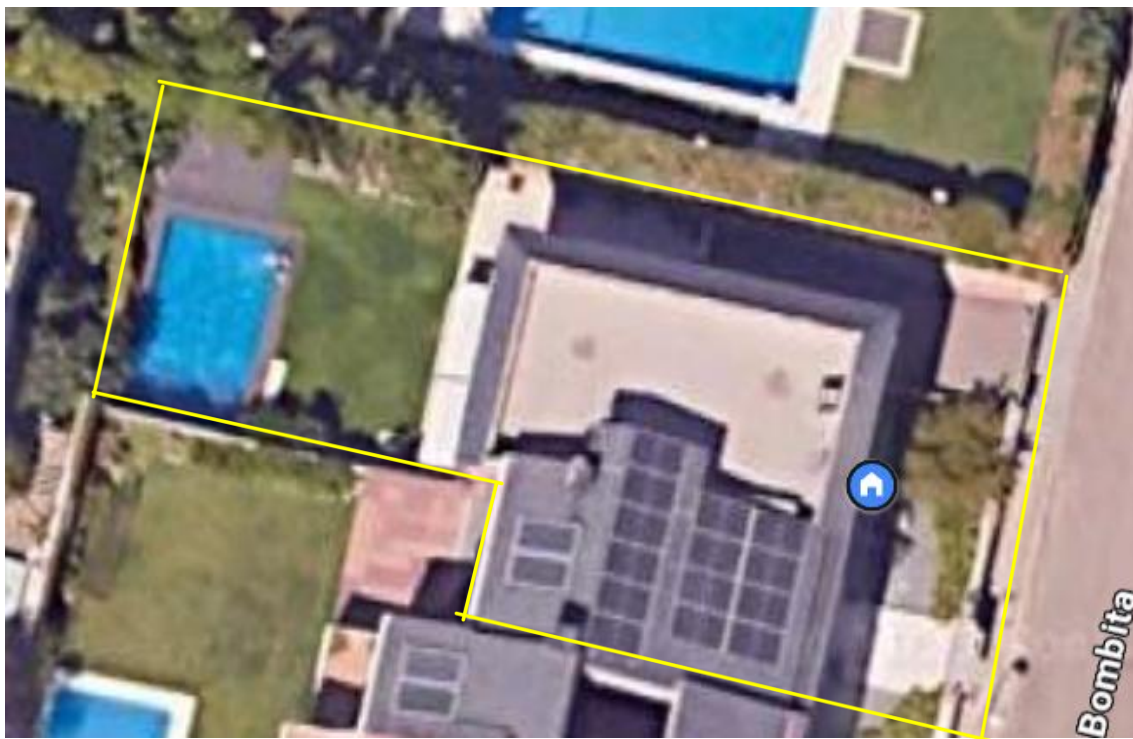


Figura 3: Vista aérea de la vivienda

Dado que el inmueble se ubica en la zona Noreste de Madrid, el clima al que se verá sometido es de tipo mediterráneo continentalizado. Este clima tiene una gran influencia por la altitud a la que se encuentra, haciendo que tenga veranos cálidos y secos e inviernos fríos y con una variabilidad térmica bastante considerable. En la figura 4 se muestra la temperatura mínima y máxima promedio en Madrid por mes a lo largo de un año.

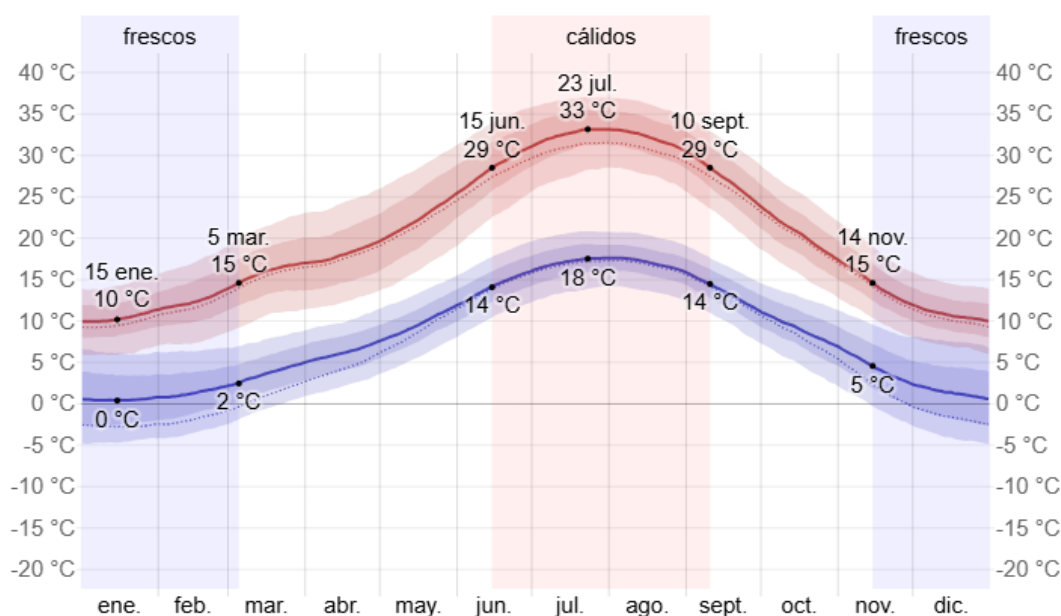


Figura 4: Temperatura mínima y máxima promedio en Madrid en 2024

Datos fuente: [13].

Por otra parte, en cuanto a la precipitación, Madrid tiene un régimen de lluvias moderado y bastante irregular a lo largo del año. Las estaciones más lluviosas son otoño y primavera, mientras que la estación más seca es el verano. Dichas precipitaciones suelen ser en forma de lluvia, aunque ocasionalmente puede haber nieve, normalmente en los meses de enero y febrero (invierno). Todo esto se resume en que la cantidad anual de lluvia en Madrid es de 392 mm [14] considerándose un nivel de precipitación medio.

Antes de comenzar a caracterizar la demanda y los consumos de la vivienda, se tienen que explicar los conceptos. La demanda energética de un sistema representa la cantidad de energía necesaria para llevar a cabo un determinado proceso o para satisfacer las necesidades de un usuario. Este valor es teórico y depende exclusivamente de los requerimientos del sistema sin considerar las ineficiencias asociadas a su operación.

Por otro lado, el consumo energético hace referencia a la cantidad real de energía utilizada para cubrir dicha demanda. En la práctica, el consumo energético suele ser mayor que la demanda debido a las pérdidas energéticas derivadas de la eficiencia de los equipos y sistemas empleados. Estas pérdidas pueden deberse a distintos factores, como la disipación de calor en procesos térmicos, la resistencia en componentes eléctricos o la conversión de energía en formas no aprovechables. La figura 5 muestra un ejemplo de lo arriba explicado:

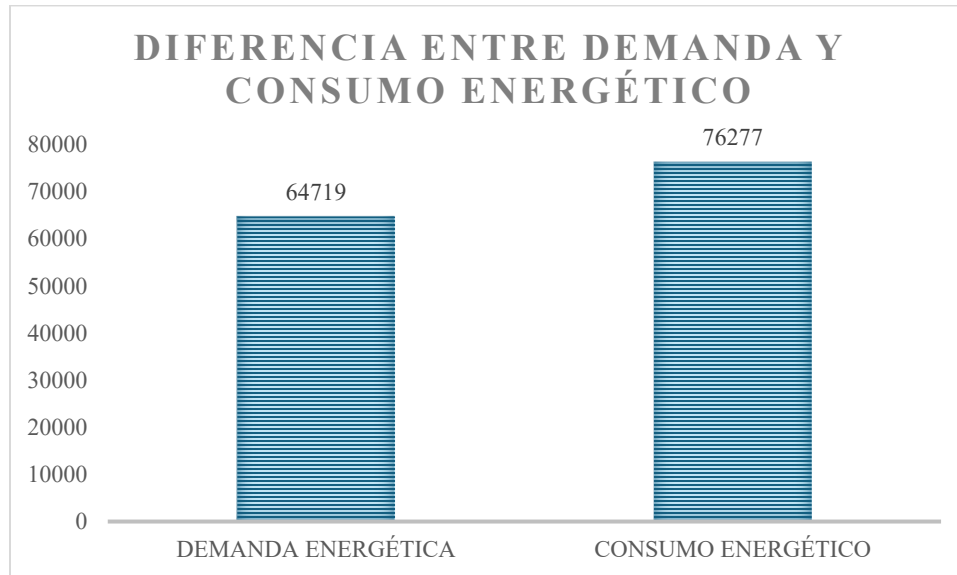


Figura 5: Ejemplo para comprender los conceptos consumo y demanda

El rendimiento energético es el factor que relaciona estos dos conceptos y se define como la fracción de la energía suministrada que se convierte en energía útil para el sistema. Matemáticamente, se expresa como:

$$\eta = \frac{\text{Demanda energética}}{\text{Consumo Energético}}$$

donde η representa el rendimiento del sistema. A medida que la eficiencia aumenta, el consumo energético se aproxima más a la demanda energética, reduciendo las pérdidas asociadas.

En la figura 5, se muestra este concepto considerando un sistema con media eficiencia (82%), lo que implica que, para satisfacer una demanda energética de 100 kWh, el sistema requiere un consumo real de aproximadamente 122 kWh. La diferencia entre ambos valores corresponde a las pérdidas energéticas, que en este caso alcanzan casi un 20% del total

suministrado. Más adelante se verá cómo afecta este rendimiento a los consumos de la vivienda, tanto de tipo térmico como de tipo eléctrico.

Una vez realizada esta aclaración de conceptos, se puede empezar a realizar la caracterización energética del inmueble.

2.1 Características energéticas de la vivienda

2.2 Caracterización de la demanda

La caracterización de la demanda del inmueble se tiene que dividir en dos subapartados separados, el primero referente a la demanda térmica y el segundo a la demanda eléctrica de energía.

2.2.1 Caracterización de la demanda térmica

El estudio de la demanda térmica en una vivienda es esencial para comprender la cantidad de energía necesaria para mantener un ambiente confortable a lo largo del año. Este apartado tiene como objetivo determinar las necesidades de calefacción y refrigeración, considerando diversos factores como las características del edificio, el aislamiento térmico, la ubicación geográfica, las condiciones climáticas y las cargas térmicas internas.

Entender la demanda térmica permite evaluar cómo la vivienda interactúa con su entorno y cómo los elementos de la envolvente térmica, como paredes, ventanas, tejados y suelos, influyen en el intercambio de calor con el exterior. A través de este análisis, es posible identificar patrones de consumo energético y prever las variaciones de temperatura que afectarán a la vivienda, lo cual es un paso previo y fundamental para implementar mejoras que optimicen el uso de la energía en el futuro.

La transmitancia térmica (U) es una de las propiedades más importantes para entender y calcular la demanda térmica de una vivienda, especialmente en las necesidades de calefacción y refrigeración. Esta propiedad se refiere a la cantidad de energía que se pierde a través de las superficies del inmueble cuando existe una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. En términos simples, la transmitancia térmica mide la capacidad de una superficie, como una pared, ventana o techo, para permitir el paso del calor desde un lugar más cálido a un lugar más frío.

Cuanto menor sea el valor de la transmitancia térmica, mayor será la resistencia térmica de esa superficie, lo que implica que se pierde menos calor en invierno o se gana menos calor en verano, contribuyendo a una temperatura interior más estable y eficiente. Por el contrario, una alta transmitancia térmica significa que la superficie permite el paso de más energía, lo que resulta en mayores pérdidas o ganancias de calor. Esto genera una mayor demanda energética para mantener una temperatura confortable dentro del hogar, incrementando los costos de calefacción o refrigeración.

En la Tabla 1, se recogen todos los datos acerca de los cerramientos opacos existentes en la vivienda:

Nombre	Tipo	Superficie [m²]	Transmitancia [W/m²*K]
Cubierta con aire-terrazza transitable	Cubierta	64,57	0,38
Cubierta con aire-cubierta inclinada	Cubierta	52,91	0,38
Muro de fachada Este	Fachada	92,42	0,63
Muro de fachada Norte	Fachada	86,53	0,63
Muro de fachada Oeste	Fachada	93,92	0,63
Muro con terreno	Fachada	26,69	0,66
Partición inferior-garaje	Partición Interior	60,91	0,30
Partición vertical-garaje	Partición Interior	21,67	0,66
Suelo con terreno	Suelo	135,21	0,36
Suelo con aire	Suelo	32,86	0,49

Tabla 1: Características de los cerramientos opacos

Nota: Las transmitancias se han obtenido de las escrituras de la vivienda

Como se ha mencionado en la descripción de la tabla, las transmitancias se han extraído directamente de las escrituras de la vivienda. El aislamiento térmico de las fachadas consta de dos paneles de hormigón de 11 cm de espesor entre los cuales se encuentra un grueso de poliuretano de 4 cm.

Es evidente que no todas las fachadas de la vivienda son opacas al completo, sino que tienen huecos en los que se alojan tanto las ventanas como las puertas del inmueble. Es por ello por lo que es necesario contemplar las transmitancias de dichos huecos para poder realizar la correcta caracterización energética de la casa. De las escrituras de la casa se ha extraído información relevante tanto de la estructura de las ventanas como de sus propiedades energéticas, imprescindibles para dicha caracterización. En cuanto a la estructura de las ventanas, todas presentan las mismas características: un doble acristalamiento separado por un perfil de aluminio relleno de un tamiz molecular (en la base de las ventanas) que evita la aparición de condensaciones en el interior de la cámara de aire.

A continuación, en la Tabla 2, se muestran las características de los huecos de las fachadas:

Nombre	Tipo	Superficie [m²]	Transmitancia [W/m²*K]	Factor solar
Hueco E V1	Ventana	2,16	2,80	0,75
Hueco E V2	Ventana	3,60	2,80	0,75
Hueco E V3	Ventana	1,96	2,80	0,75
Hueco E V4	Ventana	3,84	2,80	0,75
Hueco E V5	Ventana	3,36	2,80	0,75
Hueco N V6	Ventana	3,84	2,80	0,75
Hueco N V7	Ventana	5,04	2,80	0,75

Hueco N V8	Ventana	0,96	2,80	0,75
Hueco N V9	Ventana	1,68	2,80	0,75
Hueco N V10	Ventana	1,92	2,80	0,75
Hueco N V11	Puerta principal	1,66	5,7	0,82
Hueco N V12	Ventana	2,66	2,8	0,75
Hueco O V13	Ventana	3,60	2,8	0,75
Hueco O V14	Ventana	0,96	2,8	0,75
Hueco O V15	Ventana	1,92	2,8	0,75
Hueco O V16	Ventana	1,70	2,8	0,75

Tabla 2: Características de los huecos

Nota: Las transmitancias y factores solares se han obtenido de las escrituras de la vivienda

Una vez finalizada la caracterización de la estructura del inmueble, se procede a analizar los equipos de climatización existentes. Estos equipos de climatización se dividen principalmente en dos grupos, el equipo de calefacción y los aires acondicionados. Se estudiarán los dos grupos por separado, explicando que tipo de equipos son y las características relevantes para caracterizar correctamente la vivienda.

En primer lugar, tenemos el equipo de calefacción, que consta de una caldera de gas natural. Esta caldera es la encargada de calefactar el interior de la vivienda y satisfacer la demanda del agua caliente sanitaria (ACS) de los residentes. Las características de dicho equipo vienen recogidas en la Tabla 3:

Equipo	Marca y modelo	Combustible	Modo de funcionamiento	Potencia (kW)	Rendimiento (%)	Etiqueta energética
Caldera	BOSCH GS3000W 24 C 23	Gas Natural	Calefacción	24,00	73,00	C
			ACS	26,00	73,00	B

Tabla 3: Características de la caldera de la vivienda

Datos fuente: [15].

En cuanto a los sistemas de refrigeración, en las habitaciones se tienen aires acondicionados Split Inverter; mientras que en el salón hay un aire acondicionado por conductos (también Inverter). El término Inverter nos indica que el equipo puede proporcionar tanto refrigeración como calefacción a la habitación. Las características de todos los aires acondicionados del inmueble aparecen en la Tabla 4:

Equipo	Marca	Modelo	Potencia (kW)	EER	Etiqueta energética
Aire acondicionado 1	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	A
Aire acondicionado 2	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	A
Aire acondicionado 3	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	A
Aire acondicionado 4	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	A
Aire acondicionado 5	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	A
Aire acondicionado 6	DAIKIN	FTXS60FV1B	6,00	3,02	A
Aire acondicionado salón	DAIKIN	FBQ100C R410A	11,20	3,70	A

Tabla 4: Características de los equipos de refrigeración

Datos fuente: [16].

Con esto, se ha definido a la perfección el inmueble objeto de estudio, gracias a la caracterización de sus propiedades tanto físicas como energéticas y el sistema que utiliza para satisfacer la demanda térmica de la vivienda.

En el estudio de la demanda térmica se considerará uniforme a lo largo de los meses, haciendo una media con las demandas mensuales de un año para poder así distribuirla uniformemente en todos los meses del año. Es evidente que en los meses de invierno el gasto de gas incrementa de forma exponencial, dado que además del suministro de agua caliente sanitaria se tiene que suministrar gas para la climatización de la casa (calefacción).

Teniendo en cuenta esto, de las facturas del gas se tiene que el consumo mensual de energía térmica es de 4348,333 kWh, dando un consumo anual de 52180 kWh. Este consumo se divide en ACS, calefacción y refrigeración; teniendo unos pesos de 13,28%, 82,9% y 3,82% respectivamente. Estos porcentajes nos arrojan unos consumos anuales de 6929,5 kWh para ACS, 43257,2 kWh para calefacción y 1993,3 kWh para los equipos de refrigeración (estos están suministrados con energía eléctrica).

Toda esta energía se suministra desde la caldera cuyas características se encuentran en la Tabla 3, de la cual podemos extraer la información necesaria para cuantificar la demanda de energía térmica de la vivienda. A partir de los rendimientos que tiene la caldera y los consumos del inmueble, se puede calcular la demanda anual de este. Para ello se utilizará la siguiente ecuación:

$$E_{\text{demanda Caldera}} = \eta * E_{\text{consumida Total}}$$

En este caso, la caldera tiene rendimientos distintos para el suministro de calefacción y para el de ACS, por lo que se calcularán por separado:

$$E_{\text{demanda ACS}} = 0,73 * 6929,5 = 5058,5 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{demanda calefacción}} = 0,73 * 43257,2 = 31577,75 \text{ kWh}$$

Por último, se tiene que llevar a cabo el análisis del consumo eléctrico que supone aportar los 1993,3 kWh necesarios para satisfacer la demanda referente a la refrigeración en los meses de verano (demanda térmica de energía). Gracias a la ficha técnica de todos los equipos de refrigeración se conoce el EER (Energy Efficiency Ratio), y con este dato se puede

calcular la energía eléctrica que se consume para aportar los 1993,3 kWh. La fórmula que se va a utilizar es la siguiente:

$$E_{Eléctrica\ cons} = \frac{E_{demandada\ Térmica}}{EER}$$

Donde se sabe que la demanda térmica anual es de 1993,3 kWh, de donde se supondrá que dicha demanda térmica total se distribuye uniformemente a lo largo de todos los aires acondicionados, es decir, todos los equipos demandan lo mismo. Por otra parte, el EER se obtiene de la Tabla 4:

Equipo	Marca	Modelo	Potencia (kW)	EER	Demanda térmica anual kWh	Consumo eléctrico anual kWh
Aire acondicionado 1	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	284,76	62,58
Aire acondicionado 2	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	284,76	62,58
Aire acondicionado 3	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	284,76	62,58
Aire acondicionado 4	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	284,76	62,58
Aire acondicionado 5	DAIKIN	FTXS25G2V1B	2,50	4,55	284,76	62,58
Aire acondicionado 6	DAIKIN	FTXS60FV1B	6,00	3,02	284,76	94,29
Aire acondicionado salón	DAIKIN	FBQ100C R410A	11,20	3,70	284,76	76,96
TOTAL					1993,30	484,17

Tabla 5: Consumo y características de los aires acondicionados

El EER indica cuánta capacidad de refrigeración proporciona un equipo en relación con la energía eléctrica que consume. Como el EER es un número mayor que uno al aplicar la fórmula arriba expuesta el consumo eléctrico es siempre menor que la energía térmica que los equipos generan.

Como se ha comentado anteriormente, la demanda de energía para refrigeración se produce aisladamente en los 3 meses de verano, lo que implica que en verano la demanda mensual eléctrica tiene un pico de 161,39 kWh debido al uso de los aires acondicionados usados para enfriar la casa.

Con esto, ya estaría toda la demanda térmica del inmueble correctamente caracterizada. Los datos resumidos se exponen en la Tabla 6:

	Demanda anual (kWht)	Porcentaje de la demanda térmica total
ACS	5058,5	13,09%
Refrigeración	1993,3	5,16%
Calefacción	31577,75	81,75%
Total	38629,55	100,00%

Tabla 6: Desglose de la demanda térmica de la vivienda

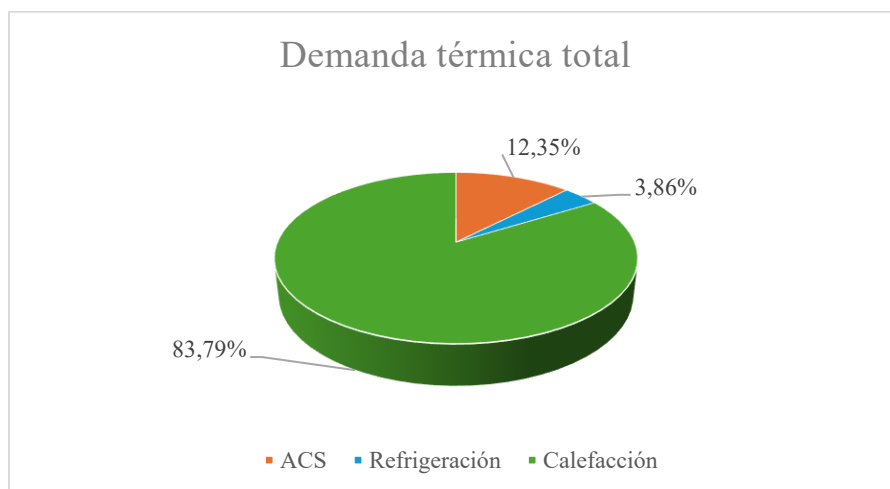


Figura 6: Distribución de la demanda térmica del inmueble

2.2.2 Caracterización de la demanda eléctrica

El estudio de la demanda eléctrica en una vivienda es fundamental para comprender el consumo de energía asociado al uso de electrodomésticos, iluminación, climatización y otros dispositivos eléctricos. Este apartado tiene como objetivo analizar los factores que determinan el consumo eléctrico de una vivienda, tales como los hábitos de los ocupantes, la eficiencia energética de los equipos y la distribución de la demanda a lo largo del año.

Entender la demanda eléctrica permite evaluar cómo se distribuye el consumo energético en los diferentes usos dentro del hogar, identificando los porcentajes sobre la demanda eléctrica total de cada tipo de equipo del inmueble. Además, el análisis de la demanda ayuda a detectar posibles ineficiencias y oportunidades de optimización, lo que es clave para reducir el consumo y mejorar la sostenibilidad energética de la vivienda. Un uso eficiente de la electricidad implica un equilibrio adecuado entre la potencia instalada y la energía consumida, evitando picos de demanda innecesarios que pueden encarecer la factura eléctrica.

La demanda eléctrica se estimará a partir del consumo eléctrico, aplicándose un rendimiento de los equipos (en el caso de los equipos eléctricos sus rendimientos nominales son muy cercanos al 100%) para poder obtener una estimación muy asemejada con la realidad en términos de demanda eléctrica del inmueble. La fórmula que se utilizará para aplicar dicho rendimiento es la anteriormente expuesta:

$$E_{Eléctrica\ demanda} = \eta * E_{Eléctrica\ consumida}$$

Donde, como se ha explicado anteriormente, el rendimiento se puede suponer del 100% ($\eta=100\%$).

Una vez se tiene claro como pasar de energía eléctrica consumida a demanda, es necesario calcular dicha energía consumida en la que nos vamos a apoyar para aplicar el factor de rendimiento. El método de obtención de energía eléctrica consumida por cada equipo se ha hecho siguiendo la siguiente fórmula:

$$Energía_{consumida\ por\ equipo\ i} = Potencia_i * Tiempo\ de\ uso_i \quad [kWh]$$

A continuación, se realizará la caracterización de cada equipo eléctrico usado cotidianamente de la vivienda. En la Tabla 6 se desglosa el consumo eléctrico de los electrodomésticos del inmueble:

Nombre	Potencia nominal (W)	Tiempo de uso al día (h)	Tiempo de uso al año (h)	Demanda Anual (kWh)
Televisión 1	300,00	5,00	1825,00	547,50
Ordenador	200,00	9,00	3285,00	657,00
Microondas	1220,00	0,15	54,75	66,80
Vitrocerámica	8200,00	2,00	730,00	5986,00
Horno	3600,00	0,30	109,50	394,20
Lavavajillas	2000,00	1,20	438,00	876,00
Frigorífico 1	200,00	24,00	8760,00	152,00
Frigorífico 2	200,00	24,00	8760,00	152,00
Congelador 1	180,00	24,00	8760,00	235,00
Congelador 2	220,00	24,00	8760,00	235,00
Lavadora	2400,00	1,00	365,00	876,00
Plancha	1600,00	1,80	657,00	1051,20
Secadora	1400,00	1,50	547,50	766,50
TOTAL	21720,00			11995,20

Tabla 7: Desglose de la demanda eléctrica de los electrodomésticos

Se ha tenido en cuenta la fórmula arriba expuesta en todos equipos a excepción de los frigoríficos y los congeladores, que se ha sacado su consumo anual directamente de sus fichas técnicas. Esto es debido a que estos electrodomésticos no trabajan al 100% de su potencia, sino que su motor se enciende y apaga según la temperatura interna. Esto haría que aplicar la

fórmula no nos diese un resultado preciso, ya que la mayor parte del día se encuentran en estado de reposo y, en dicho estado, no consumen prácticamente energía.

Con esto y teniendo en cuenta que el rendimiento de los equipos es prácticamente del 100%, tenemos que la demanda de energía eléctrica anual de los electrodomésticos de la vivienda es de 11995,2 kWh.

La vivienda cuenta con tres coches híbridos enchufables, por lo que el tiempo de carga de los coches también es un consumo a tener muy en cuenta. En la Tabla 7 se muestran los consumos (y debido al 100% de rendimiento de los equipos, también la demanda) de luz debido a la recarga de batería de los coches en el interior del inmueble:

Nombre	Potencia nominal (kW)	Consumo por cada 100 km (kWh)	Distancia recorrida al año (km)	Demanda Anual (kWh)
Coche 1	2,30	20,40	9100,00	1856,40
Coche 2	2,30	22,30	9300,00	2073,90
Coche 3	3,60	26,60	19000,00	5054,00
TOTAL	8,20			8984,30

Tabla 8: Demanda/consumo de energía debido a la carga de los coches

La demanda de energía eléctrica debido a la recarga de las baterías de los vehículos asciende a 8984,30 kWh, lo que implica que tiene un peso muy considerable en la factura de energía eléctrica.

Por otro lado, la iluminación del inmueble se compone por 61 bombillas de distintos tipos. En la Tabla 8 se desglosan las 61 bombillas tanto su tipo como sus características más relevantes:

Clase de bombilla	Número de bombillas	Potencia por bombilla (W)	Tiempo de uso al día (h)	Tiempo de uso al año (h)	Consumo anual (kWh)
Incandescentes	21,00	30,00	6,00	2190,00	1379,70
Halógenas	26,00	30,00	6,00	2190,00	1708,20
LED	14,00	20,00	6,00	2190,00	613,20
TOTAL	61,00	80,00			3701,10

Tabla 9: Consumo y características de los equipos de iluminación del inmueble

La potencia de las bombillas se ha leído directamente de su ficha técnica, mientras que el tiempo de uso al día se ha estimado en 6 horas. Esta estimación se ha llevado a cabo de la siguiente manera: de 7 a 10 de la mañana una gran parte de las luces están encendidas, y de 20:30 a 23:30 otra gran parte de las bombillas se mantienen encendidas. Si se suman los tiempos de uso tendríamos que son 6 horas.

El dato que sacamos de la Tabla 8 es que el consumo anual en iluminación del inmueble es de 3701,1 kWh, que como hemos hecho tanto en los electrodomésticos como en los coches, es igual a la demanda ($\eta=100\%$). Más adelante se analizará el porcentaje que esta demanda supone respecto a la total.

Con esto, ya se tiene caracterizada la demanda de energía eléctrica al 100%. Como se ha realizado en el caso de la demanda térmica, se considera que la demanda eléctrica anual total se distribuye uniformemente a lo largo de todos los meses del año. En la Tabla 10 se muestra el resumen de la demanda eléctrica de la vivienda:

Equipo	Potencia total (kW)	Demanda mensual (kWh)	Demanda anual (kWh)	Porcentaje de la demanda eléctrica total
Electrodomésticos	21,72	999,60	11995,20	48,60%
Iluminación	0,08	308,43	3701,10	15,00%
Coches	8,20	748,69	8984,3	36,40%
TOTAL	30,00	2056,71	24680,60	100%

Tabla 10: Demanda eléctrica de la vivienda

En la figura 6 se ha representado gráficamente la distribución de la demanda de energía eléctrica del inmueble:

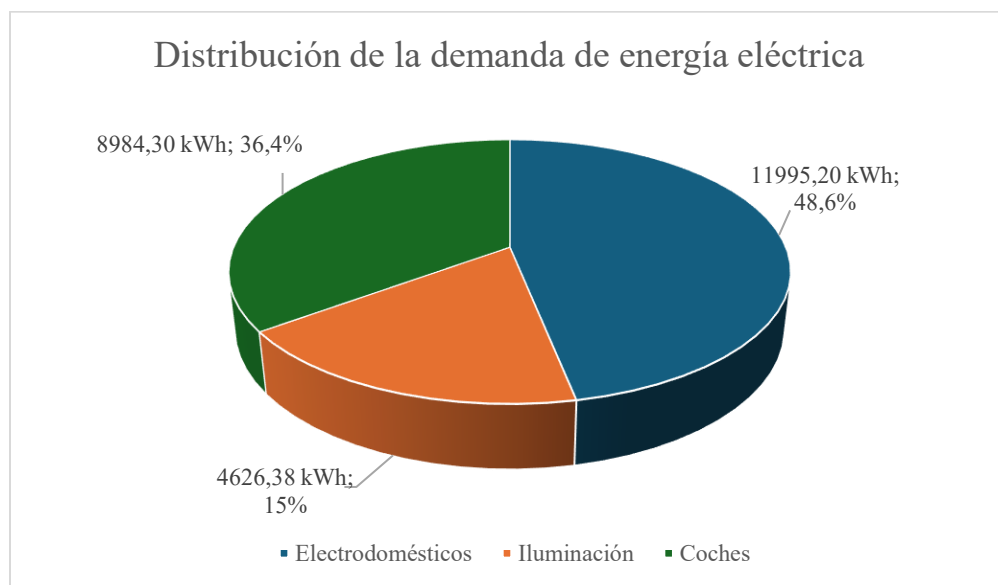


Figura 7: Distribución de la demanda eléctrica de la vivienda

Está claro que las demandas más relevantes son la de los electrodomésticos y la correspondiente a la carga de la batería de los coches, con 48,6% y 36,4% respectivamente. La iluminación supone también un porcentaje de la demanda relevante (15%). Este análisis nos indica que de cara a implementar las medidas para mejorar la eficiencia energética de la vivienda las tres primeras demandas son en las que las medidas supondrán un mayor ahorro. La demanda desglosada de los electrodomésticos aparece en la figura 7:

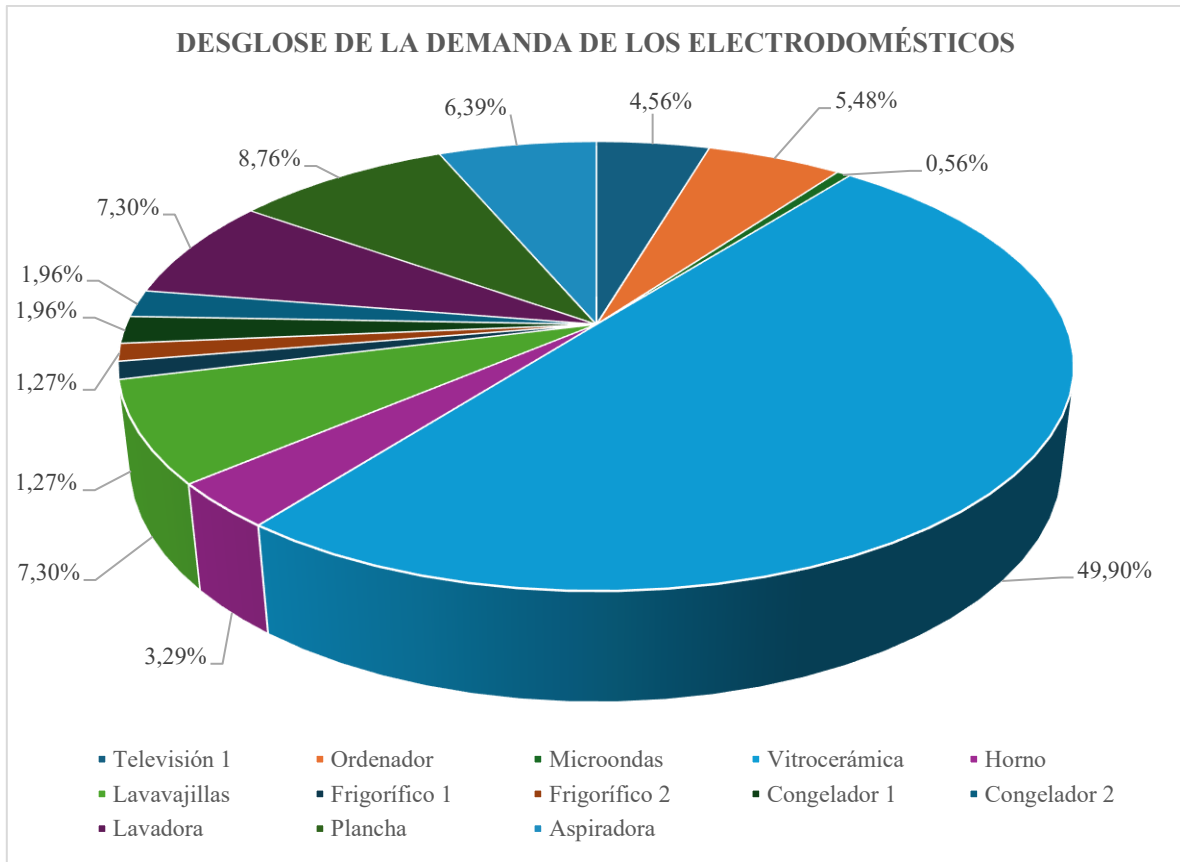


Figura 8: Distribución de la demanda eléctrica de los electrodomésticos

2.2.3 Caracterización de la demanda energética total

En este apartado se realizará el resumen de la demanda energética total, sumando tanto la demanda térmica como la eléctrica. Una vez tengamos la demanda energética total de la vivienda se estudiarán distintas medidas para conseguir el máximo ahorro de energía, así como mejorar al máximo la eficiencia energética de la casa, consiguiendo reducir en la medida de lo posible la demanda energética del inmueble.

En la Tabla 11 se muestran la demanda energética total de la vivienda, separada por los distintos equipos que tiene la misma:

EQUIPOS	Demanda anual (kWh)	Porcentaje de la demanda total de la vivienda
ACS	5058,50	7,82%
Calefacción	31577,75	48,79%
Refrigeración	1993,30	3,08%
Coches	8984,30	13,88%
Electrodomésticos	11995,20	18,53%
Iluminación	3701,1	7,15%
Aires acondicionados	484,17	0,75%
TOTAL	64719,60	100,00%

Tabla 11: Demanda energética total de la vivienda

Para poder observar de mejor forma los resultados obtenidos, se exponen gráficamente en la figura 9:

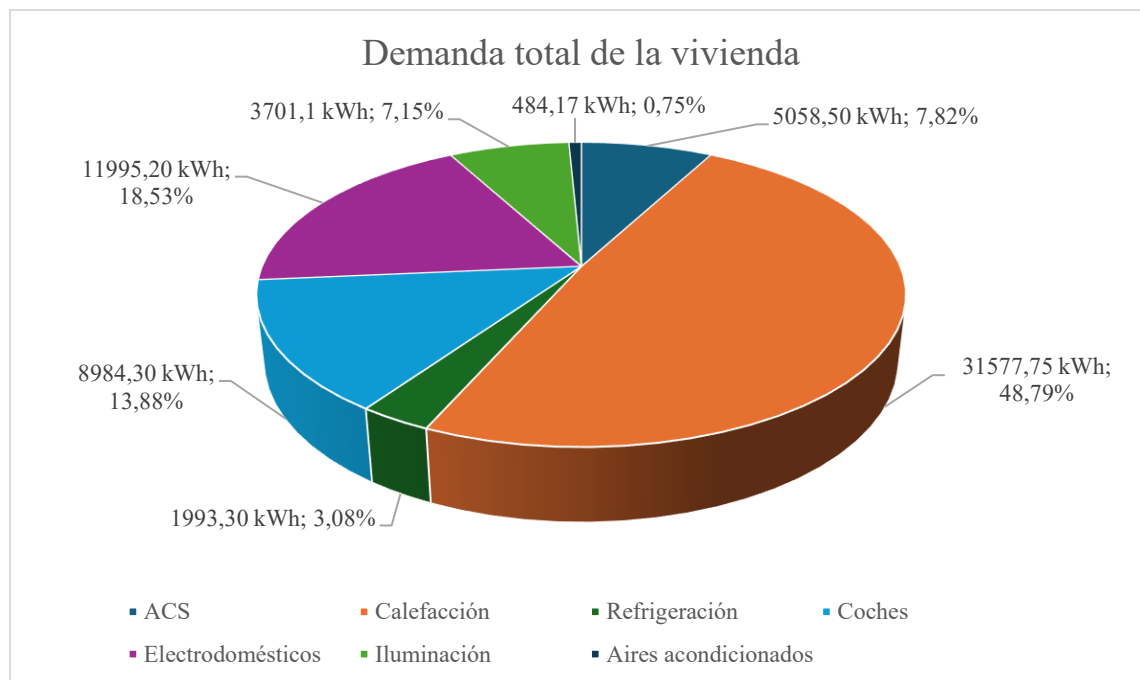


Figura 9: Distribución de la demanda energética de la vivienda

Los porcentajes obtenidos son coherentes, ya que, en los inmuebles destinados a la habitabilidad, la demanda térmica es bastante mayor a la eléctrica (59,69% frente a 40,31%). En este caso, no es tan superior debido a la presencia de los tres coches con batería eléctrica, sin este consumo de energía eléctrica, la demanda térmica ascendería a un 69,31% de la demanda energética total.

Con esto, la caracterización de la demanda energética total de la vivienda quedaría terminada.

2.3 Caracterización de los consumos de la vivienda

En este apartado se realizará la caracterización de los consumos energéticos de la vivienda, y, como se ha hecho anteriormente en la caracterización de la demanda, se dividirá en consumos térmicos y consumos eléctricos.

2.3.1 Caracterización de los consumos eléctricos

En el caso de los consumos eléctricos de la vivienda, como se ha comentado anteriormente en el apartado de la demanda eléctrica, coincidirán con las demandas eléctricas de cada

equipo de la vivienda. Esto es debido a que el rendimiento nominal de los equipos eléctricos es prácticamente del 100%, indicando que las pérdidas existentes son despreciables.

Teniendo en cuenta esto, la Tabla 12 muestra un desglose de los consumos eléctricos de la vivienda objeto de estudio:

Equipo	Potencia total (kW)	Consumo mensual (kWh)	Consumo anual (kWh)	Porcentaje del consumo eléctrica total
Electrodomésticos	21,72	999,60	11995,20	48,60%
Iluminación	0,08	308,43	3701,10	15,00%
Coches	8,20	748,69	8984,3	36,40%
TOTAL	30,00	2056,71	24680,60	100%

Tabla 12: Consumos eléctricos del inmueble

2.3.2 Caracterización de los consumos térmicos

En el caso de los consumos térmicos, sí que hay que tener en cuenta un factor de rendimiento para obtener los consumos de la casa. Esto es debido a que el suministro de calefacción y de agua caliente sanitaria es proporcionado por una caldera de gas, que en este caso sí que tiene un rendimiento distinto al 100%, lo que hace que los consumos sean siempre más altos que la demanda de la vivienda. El factor de rendimiento que se va a aplicar tiene en cuentas tanto las pérdidas de carga del suministro del gas como el rendimiento estacional de la caldera de gas natural.

En la Tabla 13 aparecen reflejados tanto los consumos de tipo térmico proporcionados por la caldera como el porcentaje que representan respecto al total:

	Demanda anual (kWh)	Rendimiento de la caldera	Consumo anual (kWh)	Porcentaje del consumo térmico total
ACS	5058,50	0,73	6929,5	13,28%
Calefacción	31577,75	0,73	43257,2	82,90%
Refrigeración	1993,30	-	1993,30	3,82%
Total	38629,55		52180	100,00%

Tabla 13: Consumos térmicos del inmueble

No se considera el rendimiento de la caldera en la refrigeración dado que no es ésta la que satisface la demanda térmica de refrigeración, sino que lo hacen los aires acondicionados (consumo eléctrico con un rendimiento prácticamente del 100%).

2.3.3 Caracterización de los consumos energéticos totales

Una vez se tienen tanto los consumos térmicos como los eléctricos se procede a realizar la caracterización de los consumos energéticos totales de la vivienda, sumando los consumos calculados en las tablas de los últimos dos apartados. La Tabla 14 expone los consumos energéticos totales del inmueble:

EQUIPOS	Consumo anual (kWh)	Porcentaje del consumo energético total
ACS	6929,50	9,08%
Calefacción	43257,20	56,71%
Coches	8984,30	11,78%
Electrodomésticos	11995,20	15,73%
Iluminación	3701,10	6,07%
Aires acondicionados	484,17	0,63%
TOTAL	76276,74	100,00%

Tabla 14: Consumo energético total de la vivienda

Debido al factor de corrección del rendimiento (explicado en los dos últimos apartados), se aprecia que la demanda eléctrica del inmueble no se ve alterada, mientras que la parte de la demanda térmica cuyo suministro viene de la caldera se ve algo incrementada respecto a la demanda total de la vivienda (Tabla 11).

En la figura 9 aparecen estos consumos en un gráfico de barras, para poder ver de una forma más cómoda donde se centran los consumos más relevantes de la vivienda:

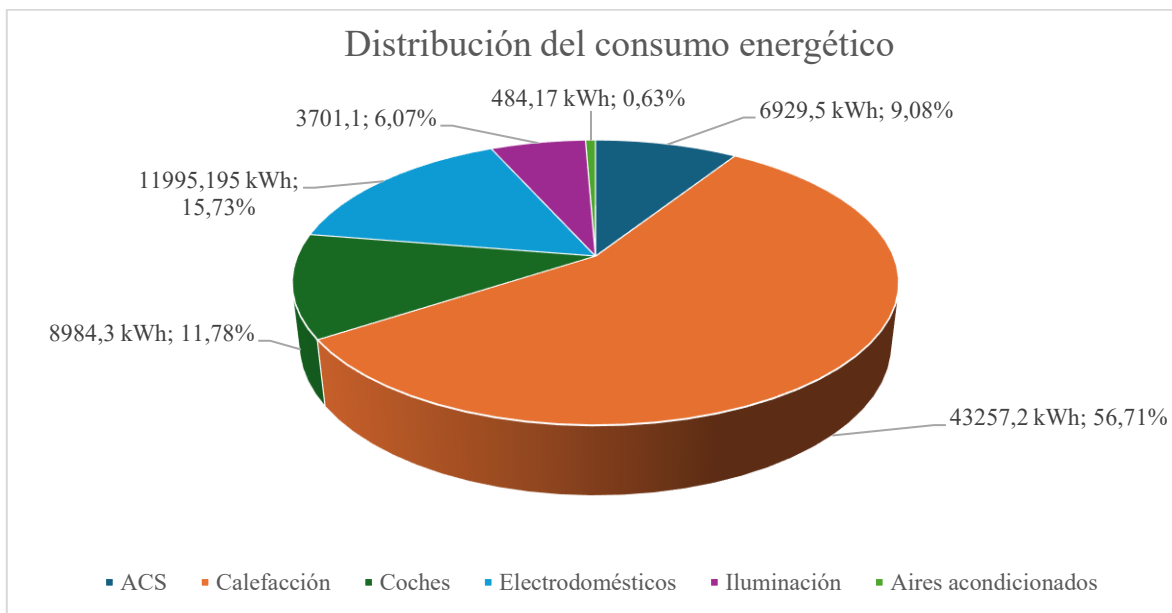


Figura 10: Distribución del consumo energético de la vivienda

2.4 Caracterización del gasto en energía

El apartado presente se trata de caracterizar el gasto económico que tiene la vivienda para satisfacer su demanda energética. En concreto, los costes van asociados a los consumos de la misma, dado que no todos los equipos que demandan energía tienen un rendimiento del 100%. Para poder calcular el coste total se tiene que dividir en el coste de electricidad y el coste de gas natural (para alimentar la caldera).

2.4.1 Factura de gas

La factura del gas natural, combustible del que se alimenta la caldera, es el coste económico necesario para suministrar la demanda térmica procedente de la caldera. En nuestro caso, se

trata tanto del suministro de calefacción del inmueble como del suministro de agua caliente sanitaria.

La factura de gas de la vivienda que se va a estudiar consta de lo siguiente:

1. Término fijo: Este es un coste fijo que se paga en cada factura, independientemente del consumo de gas. Es un importe establecido por la comercializadora y cubre el mantenimiento de la infraestructura y acceso a la red de distribución.
2. Consumo de gas: Representa el coste del gas natural consumido en el periodo de facturación. En el caso de la factura de la vivienda, se mide en kWh, pero a menudo se mide también en metros cúbicos de gas (esto último depende de la comercializadora). El coste se obtiene multiplicando el consumo por el precio del gas (€/kWh).
3. Impuesto Especial sobre hidrocarburos: Es un impuesto fijado por el Gobierno y aplicado al consumo de gas natural.
4. Otros conceptos gas: Aquí se incluyen posibles costes adicionales relacionados con el suministro de gas.
 - Alquiler del contador: Si el usuario no es propietario del contador de gas, la distribuidora cobra un alquiler mensual por su uso y mantenimiento.
5. Total gas: Es la suma de los conceptos anteriores: término fijo, consumo de gas, impuesto especial y otros conceptos (como el alquiler del contador).
6. IVA: Es el impuesto general sobre el consumo, aplicado a la base imponible (Total gas), en España es del 21%.
7. Total a pagar: Es la cantidad final que debe pagar el usuario, resultante de la suma del Total gas más el IVA.

Ahora se procederá a poner números a todos estos conceptos de la factura de gas para poder sacar el coste económico asociado a la demanda térmica. Del apartado caracterización del consumo térmico se sabe que el consumo de la vivienda es de 52180 kWh anuales, por lo que se tiene:

1. Término fijo: $0,48918 \text{ €/día} * 365 \text{ días} = 178,55 \text{ €}$
2. Consumo de gas: $52180 \text{ kWh} * 0,044324 \text{ €/kWh} = 2312,8 \text{ €}$

Nota: El precio del consumo del gas fluctúa mucho a lo largo de los meses, se ha realizado la media ponderada y se ha obtenido 0,044324 €/kWh.

3. Impuesto Especial sobre hidrocarburos: $0,002340 \text{ €/kWh} * 52180 \text{ kWh} = 122,1 \text{ €}$
4. Otros conceptos gas:
 - Alquiler del contador: $0,019016 \text{ €/día} * 365 \text{ días} = 6,94 \text{ €}$
5. Total gas: $178,55 + 2312,8 + 122,1 + 6,94 = 2620,39 \text{ €}$
6. IVA: $0,21 * 2620,39 \text{ €} = 550,28 \text{ €}$
7. Total a pagar: $2620,39 + 550,28 = \mathbf{3170,67 \text{ €}}$

Para poder satisfacer la demanda térmica de la vivienda, se han de pagar 3170,67 € anuales.

2.4.2 Factura de electricidad

La factura de electricidad representa el coste económico asociado al suministro de energía eléctrica en la vivienda. En este caso, se analizará el consumo eléctrico necesario para el funcionamiento de los diferentes electrodomésticos, sistemas de iluminación y la recarga de la batería de los coches. El estudio de esta factura permitirá evaluar el impacto del consumo eléctrico en el coste total de la energía del inmueble.

La factura de electricidad de la vivienda que se va a estudiar consta de lo siguiente:

1. Término de energía: Este es el coste asociado al consumo de electricidad durante el período de facturación. Se calcula multiplicando los kWh consumidos por el precio del kWh.
2. Término de potencia: Es un coste fijo que depende de la potencia contratada y se paga independientemente del consumo.
3. Alquiler de contador: Si el contador no es propiedad del usuario, la comercializadora cobra un alquiler por él.
4. Impuesto electricidad: Es un tributo que se aplica sobre el consumo eléctrico y la potencia contratada.
5. Base imponible: Es la suma de los conceptos anteriores: término de energía, término de potencia, impuesto electricidad y el alquiler del contador.

6. IVA: Es el impuesto general sobre el consumo, aplicado a la base imponible en España, para potencias contratadas menores a 10 kW es del 10%.
7. Total a pagar: Es la cantidad final que debe pagar el usuario, resultante de la suma de la base imponible más el IVA.

Como se ha realizado anteriormente, ahora se pondrán números sobre esta estructura para sacar el coste económico asociado a satisfacer la demanda eléctrica de la vivienda. Antes de empezar a calcular el coste que conlleva este suministro de energía es imprescindible entender la tarifa que se tiene contratada. Su principal característica es la discriminación horaria, lo que significa que el precio de la electricidad varía según la hora del día. Esta tarifa se divide en diferentes periodos para el término de energía y el término de potencia.

En cuanto al término de energía tenemos:

- Periodo punta (P1): Es el más caro y corresponde a las horas de mayor demanda de electricidad. Se aplica de lunes a viernes durante la mañana y la tarde (10:00 a 14:00 y 18:00 a 22:00).
- Periodo llano (P2): Tiene un coste intermedio y se encuentra entre las franjas de mayor y menor demanda (8:00 a 10:00, 14:00 a 18:00 y 22:00 a 00:00).
- Periodo valle (P3): Es el más económico y está diseñado para fomentar el consumo en horarios nocturnos (00:00 a 8:00). Además, este periodo se extiende durante todo el día los fines de semana y festivos nacionales.

Por otra parte, el término de potencia se divide en:

- Periodo punta (P1): Se aplica en horario diurno de lunes a viernes y tiene un coste más elevado (8:00 a 00:00).
- Periodo valle (P2): Se aplica en horario nocturno (00:00 a 8:00) y durante todo el día en fines de semana y festivos, con un coste más reducido.

Del apartado caracterización del consumo eléctrico se sabe que el consumo de la vivienda es de 24680,6 kWh anuales, por lo que se tiene:

1. Término de energía:

a. $P1: 0,18767 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 6401,47 \text{ kWh} = 1201,3 \text{ €}$

$$b. P2: 0,11610 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 4609,1 \text{ kWh} = 535,11 \text{ €}$$

$$c. P3: 0,08921 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 14595,3 \text{ kWh} = 1301,9 \text{ €}$$

$$i. \text{ Total término de energía: } 3038,3 \text{ €}$$

2. Término de potencia:

$$a. P1: 0,065376 \frac{\text{€}}{\text{kW} * \text{día}} * 9,9 \text{ kW} * 365 \text{ días} = 236,23 \text{ €}$$

$$b. P2: 0,002647 \frac{\text{€}}{\text{kW} * \text{día}} * 9,9 \text{ kW} * 365 \text{ días} = 9,56 \text{ €}$$

$$i. \text{ Total término de potencia: } 245,79 \text{ €}$$

$$3. \text{ Alquiler de contador: } 0,0451613 \text{ €/día} * 365 \text{ días} = 16,48 \text{ €}$$

$$4. \text{ Impuesto electricidad: } 3,8\% \text{ sobre } 3284,09 \text{ €} = 124,79 \text{ €}$$

$$5. \text{ Base imponible: } 3038,3 + 245,79 + 16,48 + 124,79 = 3425,36 \text{ €}$$

$$6. \text{ IVA: } 0,1 * 3425,36 = 342,536 \text{ €}$$

$$7. \text{ Total a pagar: } 3425,36 + 342,536 = \mathbf{3767,896 \text{ €}}$$

Teniendo en cuenta los distintos periodos y los precios que nos ofrece la tarifa contratada se tiene que, para poder satisfacer la demanda eléctrica de la vivienda, se han de pagar 3767,896 € anuales.

2.4.3 Resumen de las facturas de la vivienda

Una vez analizadas ambas facturas, se muestra el coste económico que acarrea la vivienda en la Tabla 15:

Tipos de consumo	Coste en €	Porcentaje sobre el coste total
Consumo térmico	3170,67	45,70%
Consumo eléctrico	3767,90	54,30%
Total	6938,57	100,00%

Tabla 15: Coste económico por suministro energético total anual

Como se observa en la Tabla 15, el coste monetario que conlleva el suministro de energía de la vivienda asciende a 6938,5 €. Es un gasto muy considerable, haciendo que el objetivo del proyecto sea reducirlo al máximo, sin perder confort, mediante el uso de distintas medidas de eficiencia energética.

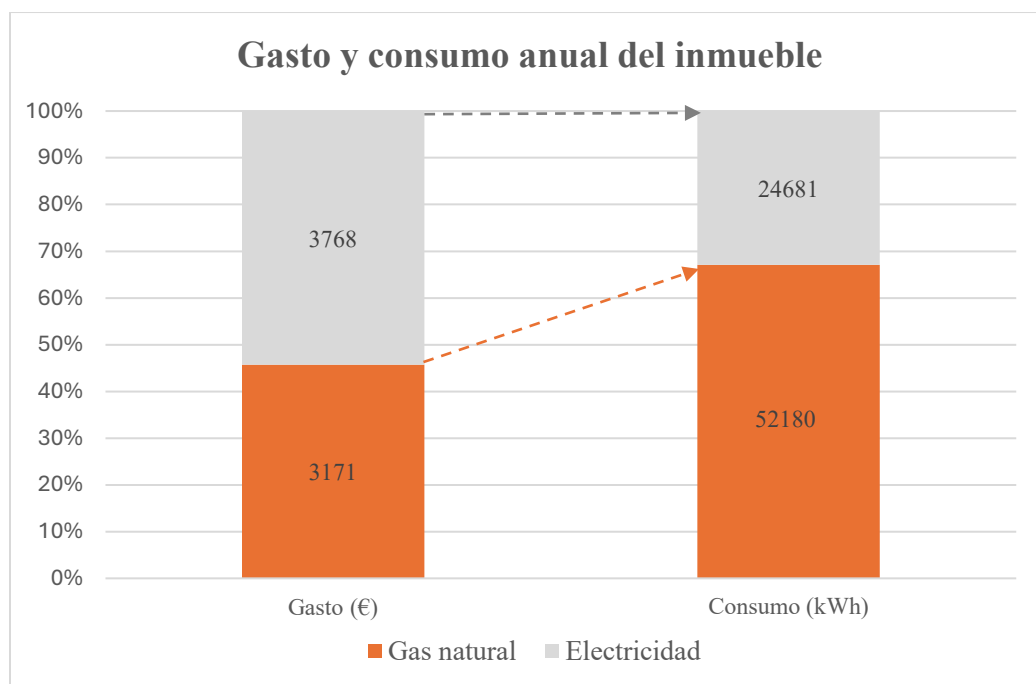


Figura 11: Comparativa gasto vs consumo anual del inmueble

En la figura 11 se muestra una comparativa del gasto (€) necesario para suplir el suministro energético de la vivienda vs el consumo (kWh) de la misma. En este gráfico de barras se muestra claramente superior el consumo térmico del inmueble (52180 kWh), pero también aparece que el precio a pagar por el gas natural que alimenta la caldera para poder satisfacer dicha demanda es menor que la factura de la electricidad. Esto nos implica que el precio a pagar por un kWh entregado por gas natural es mucho menor que el mismo kWh, pero en este caso, entregado desde la red eléctrica. Para poder hacer una comparativa, se calcula el precio de un kWh entregado tanto por gas natural como por electricidad:

3. Análisis técnico de medidas de ahorro y eficiencia energética

En el capítulo anterior, se llevó a cabo una caracterización detallada de la demanda energética, tanto térmica como eléctrica, de la vivienda unifamiliar en estudio. Además, se analizaron los sistemas actualmente en uso para satisfacer dichas necesidades energéticas, identificando sus características y nivel de eficiencia.

En este capítulo, el enfoque se centrará en la identificación y análisis de diversas estrategias orientadas al ahorro y la optimización del consumo energético dentro de la vivienda. Para ello, se estudiarán diferentes soluciones de eficiencia energética con el propósito de determinar cuáles pueden generar un ahorro significativo en el consumo de energía primaria. Se abordará tanto la reducción de la demanda energética de la vivienda (estrategias demand-side) mediante la mejora de la envolvente térmica, la optimización de los sistemas de climatización y el uso racional de la energía, como aquellas soluciones destinadas a mejorar la eficiencia en la generación y el suministro energético (estrategias supply-side), incluyendo la integración de energías renovables y el uso de tecnologías más eficientes.

El análisis no solo se centrará en la magnitud del ahorro energético potencial, sino que también considerará aspectos clave como la viabilidad técnica de cada alternativa propuesta. Por otra parte, en el siguiente capítulo del proyecto, se evaluará la conveniencia de estas medidas desde el punto de vista del propietario de la vivienda, considerando factores como la inversión requerida, el tiempo de retorno de la inversión y el impacto en la comodidad y el bienestar dentro del hogar. Finalmente, se valorará si se pueden o no implementar cada una de estas estrategias, teniendo en cuenta tanto la complejidad de la instalación como el mantenimiento requerido a largo plazo.

3.1 Introducción

La eficiencia energética, entendida como la reducción del consumo de energía primaria y final, se consigue a través de la implementación de diversas estrategias de optimización del uso energético. Estas medidas no solo contribuyen a un menor impacto ambiental, sino que

también representan un ahorro económico significativo para el propietario de la vivienda, reduciendo sus costes anuales asociados al consumo de energía. Estas medidas de ahorro y eficiencia energética son también conocidas como MAEs.



Figura 12: Clasificación energética de una vivienda en función de su eficiencia

Fuente: Repsol

El propósito de este proyecto es optimizar la eficiencia energética de la vivienda, ya sea reduciendo su demanda energética o mejorando el rendimiento de sus sistemas. En la mayoría de los casos, los dispositivos y equipos utilizados en el hogar cuentan con un nivel de eficiencia relativamente alto, por lo que la simple sustitución por modelos con una mejor calificación energética no suele ser suficiente para lograr un ahorro significativo, salvo en aquellos casos en los que los equipos sean muy antiguos y presenten un bajo rendimiento.

Este capítulo se enfoca en la disminución del consumo energético de la vivienda a través de la implementación de diversas soluciones, cuya instalación puede variar en complejidad, pero que en todos los casos generan un impacto considerable en la reducción del consumo final de energía.

Tal como se ha mencionado previamente, las estrategias de eficiencia energética pueden clasificarse en función de su enfoque principal. En este sentido, distinguimos tres categorías principales:

- Medidas Pasivas: Se aplican directamente sobre la estructura del edificio y están orientadas a mejorar su capacidad para captar, almacenar y conservar la energía. En algunos países, como Estados Unidos, estas estrategias se conocen como medidas de "conservación energética". Su objetivo es reducir la demanda energética del inmueble mediante la optimización de su envolvente térmica, que incluye elementos como la fachada, la cubierta y los cerramientos acristalados. Estas soluciones permiten minimizar las pérdidas de energía y mejorar el confort térmico sin necesidad de un consumo adicional. Entre ellas, se encuentran el refuerzo del aislamiento, la incorporación de protecciones solares y el aprovechamiento de la ventilación natural para reducir la necesidad de climatización artificial.
- Medidas Activas: Se centran en mejorar la eficiencia de los sistemas y equipos que consumen energía dentro de la vivienda. Estas soluciones buscan maximizar el rendimiento de instalaciones como la iluminación, la calefacción, la climatización o la ventilación mecánica. Para ello, se apuesta por la sustitución de equipos obsoletos por tecnologías más eficientes, la automatización del consumo y la optimización del uso de los recursos energéticos disponibles. La aplicación de estas medidas no solo contribuye a una reducción del gasto energético, sino que también mejora el desempeño general de los sistemas involucrados.
- Medidas de Generación Energética (supply-side): A diferencia de las anteriores, estas medidas no están enfocadas en reducir el consumo energético directo, sino en mejorar la eficiencia en la generación de energía dentro del hogar. Su objetivo es transformar la energía primaria en electricidad o calor de manera más eficaz y sostenible. Ejemplos de estas soluciones incluyen la instalación de calderas de condensación de alta eficiencia, cuyo rendimiento puede superar el 100%, la generación eléctrica a partir de fuentes renovables como la energía fotovoltaica, o la producción térmica mediante sistemas solares térmicos. Asimismo, la cogeneración, que permite la producción simultánea de calor y electricidad a partir de combustibles fósiles,

biomasa o energías renovables; se presenta como una alternativa eficiente para reducir el consumo de energía convencional.

Además de estas medidas, existen otras complementarias que permiten optimizar los costos asociados al suministro energético. Entre ellas, se encuentran la correcta selección y contratación de tarifas para el abastecimiento de electricidad, gas o combustibles, lo que puede representar un ahorro adicional significativo. Aunque no es el foco de este análisis, también es posible incluir estrategias relacionadas con el consumo eficiente del agua, lo que contribuiría aún más a la sostenibilidad del hogar.

3.2 Medidas en el lado de la demanda y ahorros energéticos asociados

La eficiencia energética, como uno de los pilares clave en la transición hacia un modelo energético sostenible, encuentra en la gestión de la demanda uno de sus campos de actuación más directos y efectivos. Las medidas en el lado de la demanda (también conocidas como *demand-side measures*) tienen como objetivo reducir el consumo energético del usuario final, optimizando el uso de la energía necesaria para mantener los niveles de confort y funcionalidad dentro del inmueble, sin comprometer la calidad de vida de los residentes.

En el contexto del sector residencial, y más concretamente en el ámbito de la vivienda unifamiliar objeto de estudio, la implementación de medidas de eficiencia energética en la demanda representa una herramienta con gran potencial de ahorro. Según la caracterización energética realizada en el capítulo anterior, la vivienda presenta un consumo energético total anual de 76276,74 kWh, de los cuales más de 52000 kWh corresponden al consumo térmico (gas natural) y más de 25000 kWh al consumo eléctrico, siendo este último destinado principalmente a electrodomésticos, iluminación y la carga de los vehículos eléctricos que hay en la vivienda. Esta distribución refleja que las demandas internas son responsables de la mayor parte del consumo total del inmueble, por lo que el estudio y optimización de dichas demandas se convierte en una actuación prioritaria dentro de cualquier propuesta de mejora de la eficiencia energética.

Desde el punto de vista normativo y estratégico, las políticas europeas y nacionales en materia energética coinciden en señalar la eficiencia en la demanda como uno de los

mecanismos más eficaces para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones y consumo de energía primaria. La Directiva 2018/844/UE sobre eficiencia energética de los edificios establece que los Estados miembros deben fomentar la renovación del parque edificado mediante actuaciones que reduzcan su demanda energética, priorizando aquellas que presenten una mejor relación coste-beneficio [17]. A nivel nacional, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030 fija una meta de reducción del consumo de energía primaria del 39,5% para el año 2030 [18], siendo el sector residencial uno de los principales ámbitos de actuación para cumplir con este compromiso.

En relación con esto, las medidas en el lado de la demanda se caracterizan por su versatilidad, su relativa facilidad de implementación en comparación con las medidas en el lado del suministro, y por ofrecer, en la mayoría de los casos, una rápida amortización de la inversión inicial. Estas actuaciones pueden clasificarse en varias tipologías según su naturaleza:

- Medidas de mejora tecnológica, que consisten en la sustitución o actualización de equipos consumidores de energía (electrodomésticos, sistemas de climatización, iluminación...) por otros de mayor eficiencia.
- Medidas constructivas, que buscan reducir la necesidad de energía mediante intervenciones en la envolvente térmica del edificio (aislamiento, sustitución de ventanas, control solar...).
- Medidas de gestión, que implican cambios en los hábitos de consumo, optimización del uso de los equipos, programación de horarios o automatización de sistemas.
- Medidas mixtas, que combinan varios de los elementos anteriores para lograr un impacto conjunto.

Este capítulo aborda de forma detallada el conjunto de actuaciones orientadas a reducir la demanda energética del inmueble, diferenciando entre aquellas centradas en la energía eléctrica (iluminación, electrodomésticos y vehículos eléctricos) y aquellas dirigidas a la energía térmica (calefacción, ACS y refrigeración). En primer lugar, se estudiarán las estrategias aplicables a la demanda eléctrica, analizando tanto el consumo actual de cada sistema como las alternativas más eficientes disponibles en el mercado, estimando su impacto en términos de ahorro energético anual. Posteriormente, se analizarán las posibilidades de

mejora en la demanda térmica, en especial a la envolvente del edificio, los cerramientos, la ventilación y los hábitos de uso térmico de los residentes.

Estas propuestas se realizarán en base a los datos extraídos de la propia vivienda, tanto de sus consumos anuales como de sus características constructivas, tipología de instalaciones y el clima donde se encuentra. Así, se podrán estimar de forma precisa los ahorros energéticos esperados (en kWh/año), y sentar las bases del análisis económico-financiero posterior, en el que se evaluará la rentabilidad de cada medida en función de su coste, su impacto y su periodo de retorno (Payback).

Además del impacto económico directo, muchas de estas medidas contribuyen a mejorar la calificación energética de la vivienda, incrementar su valor de mercado, y reducir significativamente su huella de carbono, alineando su comportamiento energético con los criterios de sostenibilidad exigidos en normativas actuales y futuras. Cabe señalar también que, en muchos casos, la aplicación de medidas en la demanda puede conllevar beneficios añadidos en términos de confort térmico, calidad del aire interior, durabilidad de los equipos, y reducción de la dependencia de fuentes de energía externas.

En resumen, este apartado tiene como finalidad identificar, analizar y proponer un conjunto de medidas destinadas a reducir el consumo energético de la vivienda desde el lado de la demanda, estimando su ahorro potencial, su viabilidad técnica y su aplicabilidad real en el contexto del inmueble. El éxito en la implementación de estas medidas representa un paso fundamental para alcanzar los objetivos principales del proyecto: maximizar el aprovechamiento energético, reducir el gasto anual en energía, y contribuir a la transición energética del parque residencial español.

3.2.1 Medidas en el lado de la demanda eléctrica

En la vivienda objeto de estudio, la demanda eléctrica representa una parte significativa del consumo energético total, alcanzando los 24680,6 kWh anuales. Esta energía se distribuye principalmente entre electrodomésticos, iluminación y la recarga de vehículos eléctricos. A pesar de que los equipos eléctricos suelen tener rendimientos cercanos al 100%, existe un margen de mejora bastante considerable, mediante la optimización de su uso, la sustitución de equipos antiguos por otros más eficientes y la gestión inteligente de la energía.

El objetivo de este apartado es analizar las diferentes estrategias que pueden adoptarse para reducir la demanda eléctrica sin comprometer el confort de los residentes. Para ello, se estudiarán medidas orientadas a la mejora de la eficiencia en electrodomésticos, iluminación, vehículos eléctricos y sistemas de control, estimando el ahorro energético y económico que pueden suponer en el contexto de esta vivienda concreta.

3.2.1.1 Sustitución de electrodomésticos

La renovación de electrodomésticos antiguos por modelos más eficientes es una estrategia clave para reducir el consumo energético en el hogar. Los electrodomésticos modernos con clasificación energética alta (A o superior) pueden consumir hasta un 60% menos de energía que modelos de menor eficiencia, lo que se traduce en un ahorro significativo en las facturas de electricidad y una menor huella de carbono.

En el caso de la vivienda a estudiar, se puede observar del apartado anterior que los electrodomésticos representan el 48,6% del consumo eléctrico total del hogar, llegando a consumir 11995,2 kWh al año. Esto es, la mayor parte de la energía eléctrica viene dada por este grupo de dispositivos. Por tanto, la sustitución de estos equipos por modelos más eficientes parece ser una de las principales oportunidades de ahorro energético dentro del ámbito eléctrico de la vivienda.

Antes de pasar a realizar un análisis de la demanda energética que se ahorraría, es importante destacar que la clasificación energética de los electrodomésticos ha cambiado recientemente. Hasta hace unos años, se utilizaba un sistema que incluía etiquetas como A+, A++ o A+++, pero desde marzo de 2021 la Unión Europea adoptó una nueva escala más clara y exigente [19] que va de la A (más eficiente) a la G (menos eficiente). Esta revisión buscaba corregir la confusión generada por la antigua escala, donde prácticamente todos los productos nuevos se etiquetaban como A+, A++ o A+++, sin reflejar diferencias reales de eficiencia entre ellos.



Figura 13: Nueva clasificación energética de electrodomésticos

Fuente: Ecolux

En el nuevo sistema, muchos electrodomésticos que antes estaban clasificados como A+++ han pasado a estar etiquetados como B o C, no porque consuman más, sino porque los criterios de evaluación se han vuelto más estrictos. De hecho, en el momento de la transición, la categoría A se dejó intencionadamente vacía para dar margen a los fabricantes a desarrollar productos aún más eficientes.

En el caso de la vivienda analizada, varios de los electrodomésticos actuales cuentan con etiquetas antiguas como A, lo que indica que, aunque en su momento eran relativamente eficientes, hoy existen alternativas considerablemente más avanzadas y con menores consumos. Por ello, su sustitución por modelos con clasificación energética actualizada puede traducirse en un ahorro energético significativo.

Una vez se ha comentado este detalle, se pasará a analizar los consumos de distintos electrodomésticos existentes hoy en día en el mercado, teniendo en cuenta su clasificación energética:

Clasificación energética							
Equipo	A	B	C	D	E	F	G
Frigoríficos	110 kWh/año	137 kWh/año	191 kWh/año	226 kWh/año	No procede	No procede	No procede
Congeladores	165 kWh/año	192 kWh/año	213 kWh/año	245 kWh/año	No procede	No procede	No procede
Lavadoras	0,494 kWh/clo	0,554 kWh/clo	0,592 kWh/clo	0,65 kWh/clo	No procede	No procede	No procede
Secadoras	176 kWh/año	235 kWh/año	456 kWh/año	561 kWh/año	No procede	No procede	No procede
Hornos	0,54 kWh/clo	0,69 kWh/clo	0,86 kWh/clo	0,93 kWh/clo	No procede	No procede	No procede

Tabla 16: Consumos de los electrodomésticos en el mercado

Fuente: MediaMarkt

Los electrodomésticos con etiqueta E o inferior se han considerado irrelevantes dado que no son más eficientes que los ya instalados en la vivienda. Una vez se tienen los consumos energéticos anuales de los posibles equipos a comprar, se necesita saber cuánta energía ahorran respecto a los que se tienen en el inmueble; para poder así ver cuánto de rentable es la sustitución en términos energéticos (el ahorro monetario se verá en el próximo capítulo).

Para hacer esta comparativa todos los consumos anuales tienen que estar en kWh, lo que implica que en los electrodomésticos donde la energía consumida aparece reflejada en kWh/ciclo, se transformarán a kWh/año multiplicando el número de ciclos que se realizan en un año. Las estimaciones de los ciclos y los consumos ya convertidos a kWh/año se muestran en la Tabla 17:

Energía consumida (kWh/año)					
Equipo	Ciclos anuales	A	B	C	D
Lavadoras	700	345,8	387,8	414,4	455
Hornos	450	243	310,5	387	418,5

Tabla 17: Consumos transformados a kWh/año

Ahora sí que se tienen todos los datos necesarios para realizar la comparación con los electrodomésticos actuales. Una vez se realizan los cálculos de los ahorros energéticos asociados a este cambio, se estima un ahorro máximo de 1095,9 kWh/año, en la Tabla 18 se muestra el ahorro estimado por la sustitución de los equipos de la vivienda en función de su etiqueta energética:

Equipo	Consumo anual actual	Ahorro con reemplazo A	Ahorro con reemplazo B	Ahorro con reemplazo C	Ahorro con reemplazo D
Frigoríficos	304 kWh/año	84 kWh/año	30 kWh/año	-78 kWh/año	-148 kWh/año
Congeladores	470 kWh/año	140 kWh/año	86 kWh/año	44 kWh/año	-20 kWh/año
Lavadora	876 kWh/año	530,2 kWh/año	488,2 kWh/año	461,6 kWh/año	421 kWh/año
Secadora	366,5 kWh/año	190,5 kWh/año	131,5 kWh/año	-89,5 kWh/año	-194,5 kWh/año
Horno	394,2 kWh/año	151,2 kWh/año	83,7 kWh/año	7,2 kWh/año	-24,3 kWh/año
Ahorro total	0	1095,9 kWh/año	819,4 kWh/año	345,3 kWh/año	34,2 kWh/año
Ahorro total (%)	0	45,46%	33,99%	14,32%	1,42%

Tabla 18: Ahorros energéticos por cambiar los electrodomésticos

Nótese que en los frigoríficos y los congeladores se ha multiplicado por dos el consumo energético que nos ofrece cada equipo del mercado, esto es porque en la vivienda hay dos dispositivos de cada tipo, y de no considerar que se cambian los dos el ahorro estimado no sería preciso.

Como se observa en la Tabla 18, la sustitución de electrodomésticos antiguos por modelos más eficientes puede suponer un ahorro energético bastante significativo. En concreto, la opción de reemplazo por electrodomésticos con etiqueta A permitiría reducir el consumo total en 1095,9 kWh/año, lo que representa una parte relevante del consumo eléctrico total de la vivienda. Pero si en lugar de mirar desde el punto de vista del consumo total

Por otro lado, se observa que, si se optase por electrodomésticos con etiquetas C o D, en algunos casos el consumo incluso aumenta respecto al equipo actual. Esto indica que algunos de los electrodomésticos instalados en la vivienda, aunque antiguos, podrían estar más cerca del rendimiento de un equipo moderno de clase B o C.

En resumen, la sustitución de los cinco electrodomésticos analizados por modelos con etiqueta energética A supondría un ahorro de 1095,9 kWh anuales, lo que representa aproximadamente un 4,28% del consumo eléctrico total de la vivienda. Aunque el ahorro que se consigue al cambiar los electrodomésticos por modelos más eficientes parece pequeño si lo comparamos con todo el consumo eléctrico de la vivienda (un 4,28%), la cosa cambia si nos fijamos solo en esos cinco equipos. Actualmente, el frigorífico, congelador, lavadora, secadora y horno consumen juntos 2410,7 kWh al año, así que al sustituirlos por modelos con etiqueta A, el ahorro sería de 1095,9 kWh/año. Eso supone reducir el consumo de estos aparatos en un 45,45%, casi la mitad.

Este dato deja claro que, dentro de los electrodomésticos, el cambio sí tiene un impacto muy importante, tanto en consumo como en eficiencia. Además, es una mejora que no requiere modificar los hábitos de uso ni renunciar al confort, por lo que resulta una de las medidas más eficaces y fáciles de aplicar en el corto plazo.

3.2.1.2 Sustitución de bombillas por otras de menor consumo

La iluminación es uno de los apartados donde más fácil y rápido se puede actuar para reducir el consumo eléctrico de una vivienda. Hoy en día, las bombillas LED han eliminado casi por completo a las incandescentes y halógenas, ya que ofrecen una eficiencia muy superior (hasta un 80-90% menos de consumo) y una vida útil mucho mayor, todo ello sin perder calidad en la iluminación. Además, el coste de estas bombillas ha bajado tanto que la inversión inicial se recupera en muy poco tiempo (esto en profundidad se verá más adelante).

En este inmueble en concreto, la iluminación representa un 18,07% del consumo eléctrico total, lo que equivale a 4626,38 kWh al año. Aunque una parte del sistema de iluminación ya está modernizado, todavía quedan 47 bombillas ineficientes que podrían ser sustituidas. En concreto, hay instaladas 21 bombillas incandescentes de 60 W y 26 bombillas halógenas de 42 W. Ambas son tecnologías obsoletas y poco eficientes, que además generan mucho calor y tienen una vida útil muy corta.

Lo primero de todo sería realizar un resumen de la iluminación que hay en la casa, en la Tabla

Clase de bombilla	Número de bombillas	Potencia por bombilla (W)	Tiempo de uso al año (h)	Vida útil (h)	Consumo anual (kWh)
Incandescentes	21	30	2190	1000	1379,7
Halógenas	26	30	2190	2500	1708,2
LED	14	20	2190	20000	613,2
TOTAL	61	1690	-	-	3701,1

19 aparecen reflejados todos los datos relevantes para el estudio de este apartado:

Tabla 19: Resumen de la iluminación de la vivienda

Además del evidente ahorro energético, hay otro factor clave a tener en cuenta: la vida útil de cada tipo de bombilla. Mientras que una bombilla incandescente apenas dura unas 1000 horas, una bombilla halógena puede llegar a las 2500 horas y una LED alcanza las 20000 horas. Esto significa que una bombilla LED dura hasta 20 veces más que una incandescente y 8 veces más que una halógena. Es decir, por cada bombilla LED instalada se evitaría tener

que comprar entre 8 y 20 bombillas convencionales, lo que también supone un ahorro económico a largo plazo.

Una vez conocidos los consumos de cada tipo de bombilla, es posible estimar cuánta energía se podría ahorrar si se sustituyeran todas las incandescentes y halógenas de la vivienda por bombillas LED equivalentes.

Para estimar el consumo energético con tecnología LED, se han seleccionado bombillas de 9 W y 7 W como sustitutas de las bombillas incandescentes de 60 W y halógenas de 42 W, respectivamente. Esta elección se basa en la equivalencia en flujo luminoso (lúmenes), ya que una LED de 9 W proporciona aproximadamente 700 lúmenes, lo mismo que una incandescente de 60 W, y una LED de 7 W ofrece una luminosidad similar a la de una halógena de 42 W (500 lúmenes). De esta forma, se mantiene el mismo nivel de iluminación en la vivienda, asegurando que el cambio a iluminación LED no afecte al confort de los ocupantes, mientras se consigue una reducción significativa en el consumo energético.

En la siguiente tabla se muestra el ahorro energético anual que supondría el cambio, diferenciando por tipo de bombilla sustituida. Los cálculos se han realizado manteniendo las mismas horas de uso al año para cada bombilla y comparando el consumo actual con el que tendrían si fuesen LED:

Tipo de bombilla sustituida	Nº de bombillas	Potencia LED (W)	Horas de uso/año	Consumo actual (kWh/año)	Consumo si fueran LED (kWh/año)	Ahorro energético (kWh/año)
Incandescentes	21	9	2190	1379,7	413,91	965,8
Halógenas	26	7	2190	1708,2	398,58	1309,6
Total	47	-	-	3087,9	812,49	2275,4

Tabla 20: Ahorro energético con sustitución por LED

El consumo actual total de las 21 bombillas incandescentes es de 1379,7 kWh/año, mientras que, si se sustituyeran por bombillas LED de 9 W, el consumo pasaría a ser de 413,91

kWh/año. Esto representa un ahorro energético del 70,1%, equivalente a 965,8 kWh anuales solo en ese grupo de bombillas.

Por otro lado, las 26 bombillas halógenas consumen actualmente 1708,2 kWh/año. Al cambiarlas por LED de 7 W, el consumo bajaría a 398,58 kWh/año, lo que supone un ahorro del 76,6%, es decir, 1309,6 kWh/año.

En conjunto, la sustitución de las 47 bombillas ineficientes permitiría reducir el consumo total de iluminación en 2275,4 kWh al año, lo que equivale a un 61,48% de ahorro respecto al consumo total en iluminación. Esta reducción es muy significativa si se considera que no implica ninguna pérdida de confort ni funcionalidad en la iluminación, ya que las bombillas LED seleccionadas mantienen el mismo nivel de luminosidad que las originales.

Además, estos valores se han calculado sin considerar posibles optimizaciones adicionales como sensores de presencia o control domótico, que podrían reducir aún más el consumo en determinadas zonas de la vivienda.

3.2.1.3 Aplicación de sistemas de control y automatización en el hogar

Una parte del consumo eléctrico de los inmuebles no se debe tanto al uso real de los dispositivos como a funcionamientos innecesarios o prolongados por falta de control. Por eso, una buena estrategia para mejorar la eficiencia eléctrica consiste en instalar sistemas de automatización básicos, como programadores horarios, sensores de presencia y enchufes inteligentes, que permiten optimizar el uso de la electricidad sin tener que sustituir equipos ni cambiar los hábitos de forma radical.

- Programadores horarios:

El uso de temporizadores o enchufes programables permite controlar el encendido y apagado automático de equipos eléctricos como bombas de circulación, luces exteriores o ventiladores. De esta forma se evitan consumos innecesarios cuando los dispositivos se quedan encendidos fuera de los horarios de uso habitual. Según la Guía de Ahorro de Energía [20] estos sistemas permiten adaptar los usos eléctricos al estilo de vida real del usuario,

evitando consumos por descuido o mal ajuste de horarios. Se estima que su uso podría reducir el consumo eléctrico anual entre un 1% y un 3%, tomándose en un valor del 1,5%.



Figura 14: Programador horario analógico

Fuente: LeroyMerlin

- Sensores de presencia

En zonas de paso como pasillos, garajes o baños, es habitual que las luces se dejen encendidas por olvido. La instalación de sensores de presencia o movimiento permite que la luz solo se active cuando detecta personas, y se apague automáticamente al cabo de unos segundos de inactividad. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) [21], el uso de sensores en la iluminación puede suponer hasta un 21% (12% en electrodomésticos y 9% en iluminación) de ahorro en esas zonas, lo que en términos del consumo global se traduce en una reducción de entre 0,5% y 1% del consumo eléctrico total. En este caso se escogerá un valor medio de 0,8%.



Figura 15: Sensor de movimiento

Fuente: Lampamania

- Enchufes inteligentes y consumo en stand-by

Muchos dispositivos electrónicos siguen consumiendo energía incluso cuando están “apagados”, como televisores, microondas, cargadores o equipos de sonido. Este consumo,

conocido como stand-by o consumo fantasma, puede suponer entre un 7% y un 11% del consumo eléctrico doméstico, dependiendo del número de aparatos y su tiempo de conexión [22]. Mediante enchufes inteligentes o regletas con interruptor, es posible desconectar totalmente estos aparatos cuando no se están usando, evitando este gasto oculto. Sin embargo, no todo ese consumo es eliminable; equipos como routers, frigoríficos o sistemas de climatización requieren estar constantemente conectados. En cambio, aparatos como televisores, microondas, equipos de sonido o cargadores pueden desconectarse fácilmente mediante enchufes inteligentes o regletas con interruptor. Asumiendo que se logra eliminar entre un 15% del total en stand-by, y tomando como referencia un consumo medio en stand-by del 8%, el ahorro realista queda entre 1,2% del consumo eléctrico total.



Figura 16: Enchufe inteligente

Fuente: Ikea

En definitiva, aunque estas soluciones no implican grandes inversiones ni sustitución de equipos, permiten reducir el consumo eléctrico actuando sobre el uso real que se hace de los dispositivos. La implantación conjunta de programadores horarios, sensores de presencia y enchufes inteligentes puede optimizar el funcionamiento de distintos sistemas eléctricos en la vivienda, eliminando consumos innecesarios y mejorando la eficiencia de forma sencilla y práctica. La Tabla 21 muestra un resumen de estas alternativas y su ahorro asociado:

Sistema de control	Ahorro estimado (%)	Ahorro estimado (kWh/año)
Programadores horarios	1,5	384,09
Sensores de presencia	0,8	204,85
Enchufes inteligentes (stand-by)	1,2	307,27
TOTAL	3,5	896,21

Tabla 21: Ahorros asociados a la aplicación de sistemas de control y automatización

Como se puede observar, la combinación de estas tres medidas permitiría un ahorro energético de 896,21 kWh al año, lo que equivale a un 3,5% del consumo eléctrico total de la vivienda. Si bien este porcentaje puede parecer modesto a simple vista, su valor reside en que se logra sin sustituir ningún equipo, únicamente mejorando la forma en que se usan. Además, estas medidas tienen un coste de implantación bajo, son fáciles de instalar y no comprometen en absoluto el confort de los usuarios.

3.2.2 Medidas en el lado de la demanda térmica

Dentro del análisis de eficiencia energética de una vivienda, la demanda térmica representa la cantidad de energía necesaria para mantener unas condiciones de confort adecuadas en su interior, tanto en invierno (calefacción) como en verano (refrigeración), además del suministro de agua caliente sanitaria. Esta demanda depende principalmente del comportamiento térmico de la envolvente del edificio, es decir, de su capacidad para resistir las pérdidas y ganancias de calor con el exterior.

Es importante distinguir entre demanda térmica y consumo energético real. La demanda es una necesidad energética teórica, mientras que el consumo final depende además del rendimiento del sistema de climatización que se utilice. En este apartado se analizarán únicamente las medidas que actúan sobre la demanda térmica, es decir, sobre el edificio como tal, sin entrar aún en el análisis de los equipos generadores ni en sus rendimientos. Este tema se tratará más adelante, dentro del apartado de medidas en el lado del suministro térmico.

Las medidas que se plantean en este bloque tienen como objetivo reducir las necesidades energéticas del edificio sin modificar los sistemas de calefacción o ACS, actuando directamente sobre elementos como el aislamiento de muros, techos y suelos, la eficiencia de las ventanas, o la estanqueidad frente a infiltraciones. Además de reducir el consumo, estas actuaciones suelen aumentar el confort térmico interior, mejorar la acústica y disminuir las emisiones asociadas al uso de energía.

A continuación, se desarrollarán individualmente las principales estrategias para reducir la demanda térmica del inmueble a estudiar, estimando su impacto energético y viabilidad en función de sus características constructivas.

3.2.2.1 Zonificación del sistema de calefacción mediante domótica

Una de las mejores formas de reducir la demanda térmica de calefacción sin afectar al confort es adaptar el uso del sistema a las necesidades reales de cada zona de la vivienda. En viviendas de varias plantas o con estancias de uso poco frecuente, como trasteros, despensas, garajes o salas de plancha y lavadoras, mantener la calefacción encendida supone un consumo innecesario y fácilmente evitable.

La zonificación del sistema de calefacción consiste en dividir la vivienda en áreas independientes (en este caso se realizará por plantas), permitiendo activar o desactivar la calefacción por zonas, en función de la ocupación real. Esta gestión se puede realizar de forma manual, pero resulta mucho más eficaz si se combina con un sistema de control domótico. Este permite programar horarios, gestionar temperaturas por planta, y adaptar el funcionamiento del sistema en tiempo real.



Figura 17: Vivienda con calefacción zonificada

Fuente: Climanoticias

En la vivienda que se estudia en este proyecto, la instalación de válvulas motorizadas por planta, conectadas a termostatos inteligentes y a un sistema domótico básico, permitiría mantener calefacción únicamente en las zonas habitadas (por ejemplo, salón, dormitorios y

baños), mientras se desactiva en espacios de poco uso como la planta del garaje, la despensa o la sala de plancha y lavandería. Esta actuación, además de reducir el consumo energético, permite una mejora sustancial del confort, al evitar tanto el sobrecalentamiento de zonas innecesarias como la necesidad de regular la temperatura manualmente.

Para estimar de forma realista el ahorro energético que podría obtenerse mediante la zonificación domótica del sistema de calefacción, se ha definido un patrón de uso según el comportamiento habitual de los habitantes en las distintas zonas de la vivienda. En la Tabla 22 se resume la ocupación y necesidad real de calefacción por planta, diferenciando entre aquellas de uso frecuente, como el salón y los dormitorios, y otras con una ocupación muy poco frecuente la despensa o la zona de plancha y lavadora. Esto permite visualizar claramente dónde sería viable mantener la calefacción apagada sin comprometer el confort térmico, y sirve como base para el cálculo del ahorro energético potencial derivado de esta medida.

Planta	Espacios en planta	Uso habitual	Calefacción antes	Calefacción propuesta	Tiempo de uso
Sótano	-	Prácticamente nulo	-	-	0%
Garaje / despensa	Trastero, garaje, lavandería, cuartos no habitados	Muy ocasional	Siempre activa	Apagada	0 - 5 %
Planta baja	Cocina, salón	Frecuente	Siempre activa	Se mantiene activa	100%
Primera planta	Dormitorios	Frecuente	Siempre activa	Se mantiene activa	100%
Segunda planta	Buhardilla y trastero	Muy ocasional	Siempre activa	Apagada	0 - 10 %

Tabla 22: Resumen necesidad de calefacción

A partir de este patrón de uso, y considerando que la demanda térmica es proporcional a la superficie sobre la que actúa la calefacción, se realiza una estimación del ahorro energético

asociado a la zonificación. Para ello, se ha considerado la superficie en metros cuadrados de cada planta, junto con el porcentaje de tiempo durante el cual se mantendría la calefacción encendida tras la implementación de la medida. La diferencia entre el uso anterior (100% en todas las zonas) y el uso ajustado al patrón de uso aplicado a cada planta en función de su superficie, permite obtener el ahorro térmico total.

En la Tabla 23 se muestra este cálculo detallado, además del porcentaje final de superficie que dejaría de calefactarse gracias a la implantación del sistema de control de calefacción por zonas. En la vivienda el sistema de calefacción no calienta el garaje, por ello que pese a aparecer en la tabla, no está incluido en la superficie de dicha planta.

Planta	Superficie (m²)	Uso zonificación (%)	Ahorro (%)	Ahorro (m²)
Garaje/despensa	44,3	10,0	90	39,9
Planta baja	95,3	100,0	0,0	0,0
Primera planta	101,8	100,0	0,0	0,0
Segunda planta	49,3	10,0	90	44,4
TOTAL	290,8			84,3

Tabla 23: Ahorros energéticos asociados a la zonificación del sistema de calefacción

Para poder estimar de forma más precisa el ahorro energético derivado de esta medida, se ha utilizado una fórmula que calcula el ahorro térmico en función de la superficie y el uso real de calefacción por planta. Esto es porque no todas las zonas de la vivienda ocupan la misma superficie, por eso hay que tener en cuenta cuántos metros cuadrados representan y cuánto tiempo se mantendrán sin calefacción. Así, el ahorro de cada planta se calcula en función del uso que se le va a dar, y luego se pondera respecto al total de la vivienda. De esta forma, se obtiene un porcentaje final que refleja qué parte de la demanda térmica total puede eliminarse de forma efectiva gracias a la zonificación. Para sacar números como se aplica la siguiente fórmula:

$$Ahorro\ total = \frac{\sum Ahorro\ por\ planta\ (m^2)}{Superficie\ total\ a\ calefactar\ (m^2)} * 100$$

$$Ahorro\ total = \frac{44,4 + 39,9}{290,8} * 100 = 28,98\%$$

En resumen, la implantación de domótica que permita zonificar la calefacción en función del uso real de cada planta permite reducir de forma muy considerable la demanda térmica de la vivienda. En este caso concreto, tras analizar los metros cuadrados de cada zona y su tiempo estimado de uso, se ha calculado un ahorro térmico en calefacción del 28,98% respecto a la situación actual, en la que toda la vivienda se climatiza por igual. Este porcentaje se traduce en una reducción de demanda térmica total de 9145,44 kWh/año. Esta medida no solo reduce significativamente el consumo energético asociado a calefacción, sino que también mejora la gestión del sistema, aporta mayor confort y supone una intervención sencilla y de bajo coste comparado con otras soluciones constructivas.

3.2.2.2 Mejora del aislamiento térmico de la envolvente

El aislamiento térmico de una vivienda es uno de los factores más determinantes a la hora de reducir la demanda energética asociada a calefacción y refrigeración. Una envolvente con baja resistencia térmica provoca pérdidas de calor en invierno y ganancias indeseadas en verano, lo que obliga a los sistemas de climatización a trabajar más para mantener unas condiciones interiores confortables.

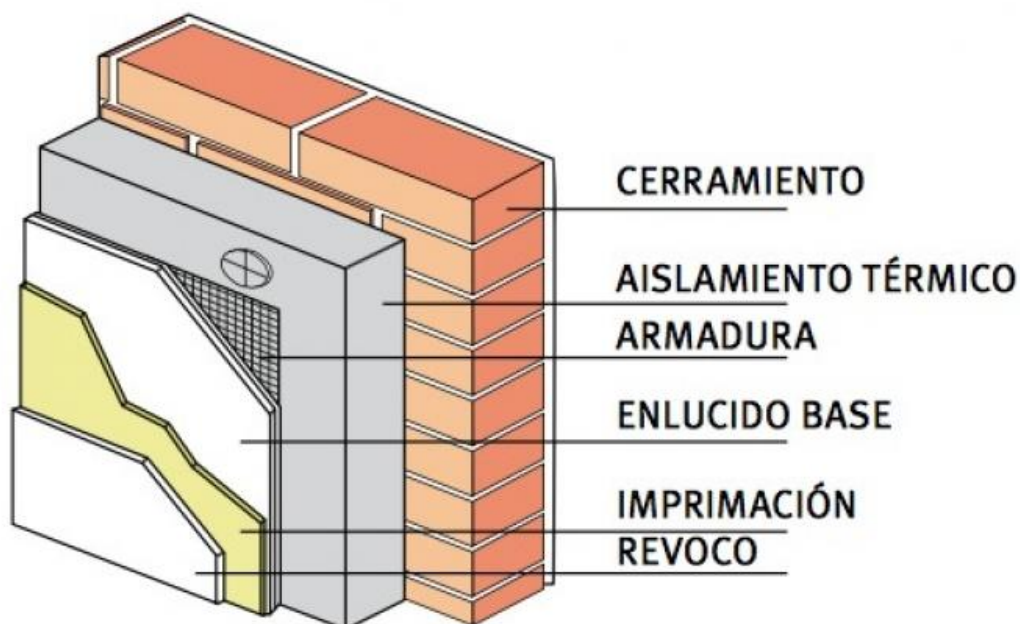


Figura 18: Envolvente térmica de un edificio

Fuente: Certicalia

Actuar sobre la envolvente del edificio permite reducir directamente la cantidad de energía necesaria para alcanzar la temperatura deseada, ya que mejora el comportamiento pasivo del inmueble. Además, se trata de una medida pasiva y duradera, ya que, una vez realizado el aislamiento, el ahorro se mantiene constante durante toda la vida del material, sin necesidad de mantenimiento ni consumo adicional de energía.

En esta vivienda en concreto, la caracterización de la vivienda en el aspecto térmico (transmitancias) ha mostrado que existen posibilidades de mejora en el aislamiento de cerramientos opacos, como muros exteriores y techos. Por tanto, se plantea como medida de eficiencia la incorporación de materiales aislantes que reduzcan las pérdidas térmicas a través de la envolvente.

Antes de analizar las posibles mejoras en el aislamiento térmico de la vivienda, es importante entender por dónde se produce la mayor parte de las pérdidas de calor en un hogar típico. Según datos de Ecoisola [23], en edificios sin un aislamiento adecuado, cerca del 30% del calor se escapa a través del tejado, mientras que aproximadamente un 25% se pierde por las paredes y ventanas (no son objeto de estudio en este apartado). El suelo también es una zona de intercambio térmico no deseado, con un 7% del total. Estos porcentajes justifican la importancia de actuar sobre la envolvente del edificio, especialmente en aquellas zonas que representan una mayor proporción de pérdidas energéticas, como son los muros exteriores y la cubierta.

Ahora se irá punto por punto analizando las posibles medidas para cada zona de la vivienda:

- **Aislamiento térmico de la cubierta:**

La cubierta es una de las zonas más críticas en cuanto a pérdidas térmicas en una vivienda. Al ser la superficie más expuesta a las condiciones climáticas exteriores (sol, lluvia, viento, etc...), actúa como un puente directo entre el interior y el exterior. Es por ello que mejorar el aislamiento térmico de la cubierta se convierte en una de las medidas más efectivas para reducir la demanda de calefacción. Existen principalmente 3 opciones que se pueden aplicar, que son:

- ✓ Cubierta ventilada o sistema sándwich: este método consiste en colocar una capa de aislamiento térmico (normalmente espuma de poliuretano) sobre el forjado o

bajo el revestimiento exterior. Al ser una medida que se realiza desde el exterior, no reduce el espacio interior de la vivienda y elimina el puente térmico arriba mencionado.



Figura 19: Cubierta ventilada con espuma de poliuretano

Fuente: Grupo Panel Sandwich

- ✓ Aislamiento bajo cubierta: para aplicar este aislamiento, se necesita tener acceso desde una buhardilla o falso techo, donde se instala el aislamiento por la cara interna (comúnmente lana de roca o poliestireno extruido entre viguetas). Como en el caso del inmueble que se estudia se tiene acceso desde la buhardilla, es una opción a tener en cuenta.



Figura 20: Ejemplo de aislamiento bajo cubierta

Fuente: aísla \$ ahorra

- ✓ Insuflado en falsos techos: en este caso se insufla material aislante (se suele usar celulosa o lana mineral) sobre el falso techo.

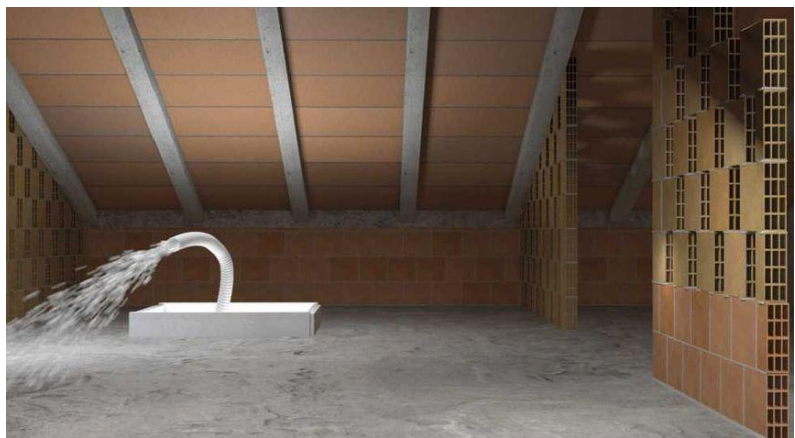


Figura 21: Ejemplo de insuflado en falso techo

Fuente: Prolisur

Para comparar la eficacia de las distintas soluciones de aislamiento para la cubierta, en la Tabla 24 se muestran los valores aproximados de transmitancia térmica (U) asociados a cada sistema, junto con el tipo de material habitual utilizado. Este parámetro expresa la cantidad de calor que atraviesa el cerramiento por metro cuadrado y por cada grado de diferencia de temperatura ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), por lo que cuanto menor sea su valor, mejor será el comportamiento térmico del sistema. La resistencia térmica es la inversa de la transmitancia térmica, también indicada en la tabla.

Sistema de aislamiento	Material habitual	Transmitancia térmica ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)	Resistencia térmica ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)
Aislamiento tipo sándwich	Espuma de poliuretano	0,2	5,0
Aislamiento interior bajo cubierta	Lana de roca	0,3	3,3
Insuflado en falso techo	Lana mineral insuflada	0,35	2,9

Tabla 23: Transmitancia y resistencia térmica en viviendas

Como se observa en la tabla, el sistema de aislamiento exterior tipo sándwich es el que ofrece mejores resultados en cuanto a eficiencia térmica, ya que tiene la menor transmitancia y, por

tanto, la mayor resistencia al paso del calor. Es la opción más completa, aunque también suele requerir una reforma más profunda.

Para valorar el impacto de mejorar el aislamiento de la cubierta, se ha comparado la situación actual vs un sistema tipo sándwich. En la Tabla 24 se recogen las superficies de cada cubierta, su transmitancia actual y la que se obtendría con la solución propuesta. A partir de estos datos se estima la reducción térmica total alcanzada en cada caso.

Nombre	Superficie (m ²)	Transmitancia actual (W/m ² ·K)	Transmitancia SATE (W/m ² ·K)	Reducción de transmitancia (W/m ² ·K)	Reducción total (W/K)
Cubierta con aire-terraza transitable	64,57	0,38	0,2	0,18	11,6226
Cubierta con aire-cubierta inclinada	52,91	0,38	0,2	0,18	9,5238

Tabla 24. Ahorro térmico estimado tras mejora del aislamiento en cubierta

Una vez se tiene la reducción total en W/K, se necesita sacar el ahorro en kWh/año, para ello se aplicará la siguiente fórmula:

$$Ahorro \left(\frac{kWh}{año} \right) = \frac{\Delta U * A * \Delta T * t \text{ (horas de calefacción al año)}}{1000}$$

Donde:

$$\Delta U = 0,18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$A = 117,48 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = (\text{temperatura interior media} = 21^\circ\text{C} - \text{temperatura media en invierno} = 8^\circ\text{C}) = 13^\circ\text{C} = 13\text{K}$$

$$t = 3 \text{ meses} * 30 \text{ días} * 24 \text{ horas} = 2160 \text{ h}$$

$$Ahorro \left(\frac{kWh}{año} \right) = \frac{0,18 * 117,48 * 13 * 2160}{1000} = 593,8 \text{ kWh/año}$$

Aplicando este aislamiento a las dos cubiertas de la vivienda se estima una reducción de pérdidas térmicas de aproximadamente 593,3 kWh/año, considerando una diferencia media de 13 °C entre interior y exterior y unas 2160 horas de calefacción anuales. Este valor confirma la efectividad de esta medida de ahorro energético.

- **Aislamiento térmico de las fachadas:**

Las fachadas representan una parte importante de la envolvente térmica de la vivienda, y si no están correctamente aisladas, pueden generar pérdidas de calor muy significativas. De hecho, se estima que hasta un 25% del calor puede escaparse por los muros exteriores en viviendas mal aisladas. Por eso, actuar sobre estos cerramientos puede suponer una mejora importante en el comportamiento térmico del inmueble. En función del tipo de fachada y de las limitaciones de la vivienda, existen distintas formas de incorporar aislamiento térmico: desde soluciones exteriores como el sistema SATE, hasta opciones más sencillas como el insuflado en cámaras de aire o el trasdosado por el interior. Existen principalmente 2 tipos de aislamiento de fachadas, que son:

- ✓ Sistema SATE (Aislamiento por el exterior): este método consiste en aplicar paneles aislantes sobre la fachada exterior, normalmente de EPS, lana mineral o corcho, cubiertos con una capa de mortero. Es una solución muy buena porque elimina puentes térmicos y no resta espacio interior.

CAPAS DE UN AISLAMIENTO **SATE**

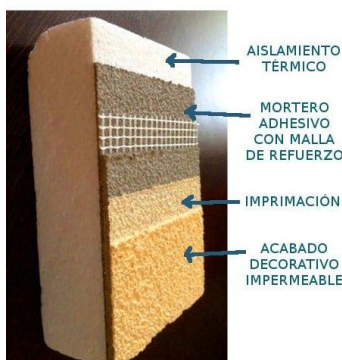


Figura 22: Ejemplo de fachada con sistema SATE

Fuente: Ficherotecnia

- ✓ Insuflado en cámara de aire: Cuando la fachada tiene cámara de aire, se puede rellenar con materiales como lana mineral o celulosa, sin necesidad de obras invasivas. Es una solución rápida, económica y sencilla; y su rendimiento depende del espesor y estado de la cámara. Aun así, puede representar una mejora térmica importante si se ejecuta correctamente.

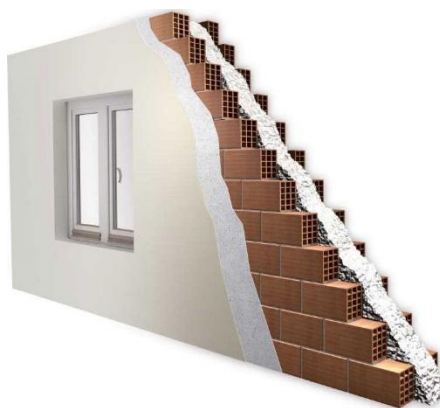


Figura 23: Ejemplo de fachada con aislamiento insuflado en su interior

Fuente: Prolisur

A continuación, se resumen estas alternativas en una tabla comparativa, donde se recogen sus materiales más habituales, su transmitancia térmica y algunas observaciones sobre su aplicación.

Una vez descritas las dos soluciones más representativas para mejorar el aislamiento de las fachadas, se resumen sus características en la Tabla 25. En ella se recogen los materiales más habituales, la transmitancia térmica de cada sistema y su resistencia térmica:

Sistema de aislamiento	Material habitual	Transmitancia térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)	Resistencia térmica ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)
SATE (exterior)	Poliestireno expandido (EPS)	0,2	5
Insuflado en cámara de aire	Lana mineral	0,35	2,9

Tabla 25: Comparativa de aislamiento en fachas

Para valorar el impacto de mejorar el aislamiento de toda la fachada, se ha comparado la situación actual con una intervención mediante sistema tipo sándwich. En la Tabla 26 se recogen las superficies de cada cubierta, su transmitancia actual y la que se obtendría con la solución propuesta. A partir de estos datos se estima la reducción térmica total alcanzada en cada caso, para posteriormente calcular el ahorro energético asociado a dicha medida.

Nombre	Superficie (m ²)	Transmitancia actual (W/m ² ·K)	Transmitancia SATE (W/m ² ·K)	Reducción de transmitancia (W/m ² ·K)	Reducción total (W/K)
Muro de fachada Este	92,42	0,63	0,25	0,38	35,12
Muro de fachada Norte	86,53	0,63	0,25	0,38	32,88
Muro de fachada Oeste	93,92	0,63	0,25	0,38	35,69
Muro con terreno	26,69	0,66	0,25	0,41	10,94

Tabla 26: Ahorro térmico estimado tras mejora del aislamiento en fachadas

Siguiendo la misma dinámica que en el apartado de cubierta, tenemos que:

$$Ahorro \left(\frac{kWh}{año} \right) = \frac{\Delta U * A * \Delta T * t \text{ (horas de calefacción al año)}}{1000}$$

Primero calculamos los tres muros que no están en contacto con la vivienda colindante:

$$Ahorro \left(\frac{kWh}{año} \right) = \frac{0,38 * (92,42 + 86,53 + 93,92) * 13 * 2160}{1000} = 2911,63 \text{ kWh/año}$$

Ahora se calcula el muro que linda con el inmueble pareado:

$$Ahorro \left(\frac{kWh}{año} \right) = \frac{0,41 * 26,69 * 13 * 2160}{1000} = 307,27 \text{ kWh/año}$$

Tras analizar cada uno de los muros de fachada por separado, se observa que todos presentan una transmitancia térmica inicial elevada, en torno a 0,63-0,66 W/m²·K, lo que implica una baja resistencia térmica. Al aplicar un sistema de aislamiento tipo SATE, se consigue reducir notablemente dicha transmitancia, con un impacto directo sobre las pérdidas térmicas de cada

cerramiento. En conjunto, esta mejora representa un ahorro energético anual estimado de 3218,9 kWh, lo que confirma que la actuación sobre las fachadas es una de las medidas más efectivas para reducir la demanda de calefacción en la vivienda.

- **Aislamiento térmico del suelo:**

El suelo también forma parte de la envolvente térmica de la vivienda, y aunque sus pérdidas suelen ser menores que las de otros elementos como la cubierta o las fachadas, sigue siendo un punto importante a tener en cuenta. En viviendas donde el suelo está en contacto directo con el terreno, las pérdidas de calor pueden llegar a representar un 7% de la demanda de calefacción si no existe aislamiento térmico. Además, estas pérdidas afectan directamente al confort térmico de los espacios habitables, generando suelos fríos y mayor consumo energético para mantener la temperatura deseada. En este caso también existen 2 tipos de aislamientos:

- ✓ Aislamiento por el interior (encima del forjado): Consiste en colocar una capa aislante rígida (como XPS o poliuretano) sobre el suelo existente, generalmente acompañado de una nueva capa de pavimento. Es eficaz, aunque puede elevar ligeramente el nivel del suelo.



Figura 24: Ejemplo de aislamiento encima del forjado

Fuente: Paratureforma

- ✓ Aislamiento por el exterior (por debajo del forjado): Si se tiene acceso desde un local inferior o desde el terreno, puede colocarse aislamiento directamente en la parte inferior del forjado. Es más complejo de ejecutar, pero no afecta al nivel interior del suelo

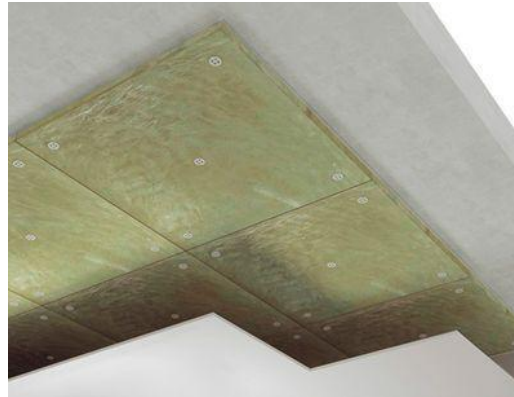


Figura 25: Ejemplo de aislamiento debajo del forjado

Fuente: Construnario

A continuación, se resumen estas alternativas en una tabla comparativa, donde se recogen sus materiales más habituales, su transmitancia térmica y algunas observaciones sobre su aplicación.

Una vez descritas las dos soluciones más representativas para mejorar el aislamiento del suelo, se resumen sus características en la Tabla 27. En ella se recogen los materiales más habituales, la transmitancia térmica de cada sistema y su resistencia térmica:

Sistema de aislamiento	Material habitual	Transmitancia térmica ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)	Resistencia térmica ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)
Aislamiento superior (sobre forjado)	Poliuretano rígido	0,25	3,33
Aislamiento inferior (bajo forjado)	Lana mineral, espuma proyectada	0,35	2,86

Tabla 27: Comparativa de aislamiento en forjados

Como en los anteriores apartados, se calculará el ahorro en kWh /año mediante la medida de aislamiento sobre forjado, ya que es esta la que mayor ahorro generará:

Nombre	Superficie (m²)	Transmitancia actual (W/m²·K)	Transmitancia mejorada (W/m²·K)	Reducción de transmitancia (W/m²·K)	Reducción térmica total (W/K)
Suelo con terreno	135,21	0,36	0,25	0,11	14,8731
Suelo con aire	32,86	0,49	0,25	0,24	7,8864

Tabla 28. Ahorro térmico estimado tras mejora del aislamiento en forjados

Siguiendo la misma dinámica se tiene que:

$$Ahorro \left(\frac{kWh}{año} \right) = \frac{0,11 * 135,21 * 13 * 2160}{1000} = 417,64 kWh/año$$

$$Ahorro \left(\frac{kWh}{año} \right) = \frac{0,24 * 32,86 * 13 * 2160}{1000} = 221,45 kWh/año$$

Una vez analizados los dos tipos de suelo existentes en la vivienda, se ha comprobado que ambos presentan valores de transmitancia mejorables. Aplicando un sistema de aislamiento térmico superior, como paneles rígidos de poliuretano, se consigue reducir significativamente las pérdidas energéticas a través del suelo. En concreto, la mejora del aislamiento en ambas zonas supondría un ahorro total estimado de 603,09 kWh/año, lo que demuestra que, aunque el impacto global es menor en comparación con fachadas o cubierta, esta medida sigue representando una actuación eficaz dentro del conjunto de mejoras pasivas de la envolvente térmica.

Para tener una visión global del impacto de las medidas pasivas propuestas, se ha elaborado la Tabla 29, que resume los ahorros energéticos estimados derivados de la mejora del aislamiento en los distintos elementos de la envolvente térmica: cubierta, fachadas y suelos. Además del valor en kWh/año, se muestra el porcentaje que representa cada medida respecto al total del ahorro conseguido, lo que permite identificar claramente qué zonas tienen mayor peso en la eficiencia energética de la vivienda.

Elemento	Ahorro energético (kWh/año)	% del total de ahorro
Cubierta	593,3	13,4
Fachadas	3218,9	72,9
Suelos	603,09	13,7

Tabla 29: Resumen ahorros energéticos por mejorar la envolvente térmica

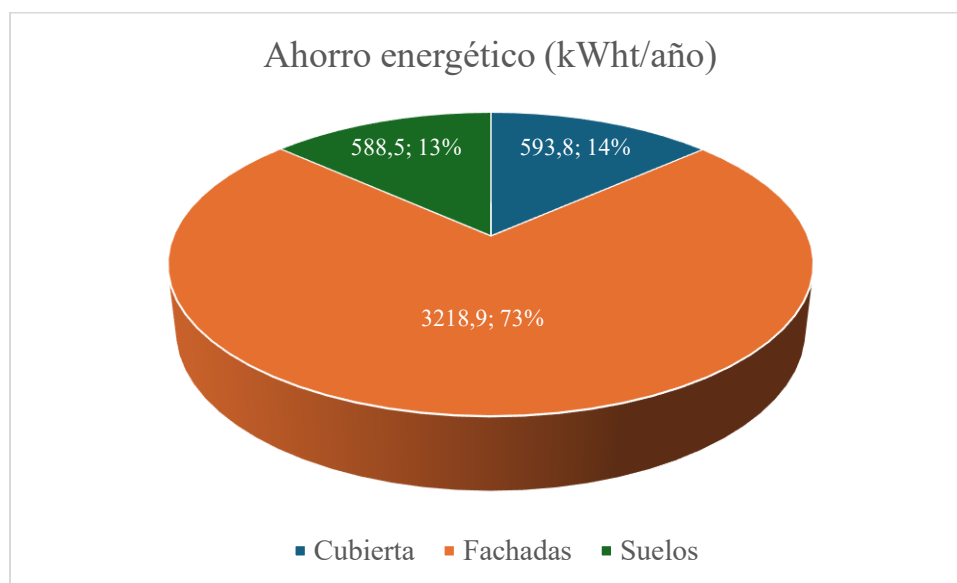


Figura 26: Resumen ahorros energéticos por mejorar la envolvente térmica

En resumen, la mejora del aislamiento en cubierta, fachadas y suelos permitiría alcanzar un ahorro de 4401,2 kWh/año, que representa una reducción del 13,94% sobre el total de energía térmica demandada por parte de la calefacción. Estos datos muestran que reforzar la envolvente no solo mejora el confort térmico del hogar, sino que también representa una de las estrategias más efectivas para reducir el consumo de calefacción de manera estructural y duradera, sin depender de cambios de hábitos por parte del usuario.

3.2.2.3 Mejora de ventanas

Las ventanas son uno de los puntos más sensibles de la envolvente térmica, ya que su resistencia al paso del calor es significativamente menor que la de un muro opaco, incluso

con cerramientos modernos. Si no están correctamente aisladas, pueden representar entre el 15% y el 30% de las pérdidas térmicas en una vivienda. Además de pérdidas por conducción a través del vidrio y el marco, también se producen infiltraciones de aire si hay falta de estanqueidad.

Por eso, la sustitución de ventanas antiguas por otras con mejor comportamiento térmico es una de las medidas más habituales y eficaces en rehabilitación energética. Esta mejora puede incluir vidrios dobles o triples con cámara, cristales bajo-emisivos, marcos con rotura de puente térmico y sellado perimetral de calidad.

Para este análisis se ha optado por considerar la sustitución de las ventanas actuales por un sistema de triple acristalamiento con baja emisividad, con una transmitancia térmica de $0,66 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [24]. Esta solución se encuentra entre las más eficientes del mercado, ya que proporciona un excelente aislamiento térmico sin comprometer la entrada de luz natural ni la visibilidad. Además, permite reducir de forma significativa las pérdidas de calor en invierno y las ganancias térmicas en verano, mejorando tanto la eficiencia energética global como el confort interior.



Figura 27: Ventana con triple acristalamiento

Fuente: Amazon

En la Tabla 30 se recogen las superficies de los huecos analizados, sus valores de transmitancia actuales, la mejora obtenida con el nuevo sistema y el ahorro energético estimado en cada caso. Este cálculo se ha realizado teniendo en cuenta la diferencia media de temperatura en invierno y el número de horas de calefacción al año, siguiendo el mismo procedimiento aplicado en los apartados anteriores.

Nombre	Superficie (m²)	Transmitancia actual (W/m²·K)	Transmitancia mejorada (W/m²·K)	Reducción de transmitancia (W/m²·K)	Ahorro energético (kWh/año)
Hueco E V1	2,16	2,8	0,66	2,14	129,80
Hueco E V2	3,6	2,8	0,66	2,14	216,33
Hueco E V3	1,96	2,8	0,66	2,14	117,78
Hueco E V4	3,84	2,8	0,66	2,14	230,75
Hueco E V5	3,36	2,8	0,66	2,14	201,91
Hueco N V6	3,84	2,8	0,66	2,14	230,75
Hueco N V7	5,04	2,8	0,66	2,14	302,86
Hueco N V8	0,96	2,8	0,66	2,14	57,69
Hueco N V9	1,68	2,8	0,66	2,14	100,95
Hueco N V10	1,92	2,8	0,66	2,14	115,38
Hueco N V12	2,66	2,8	0,66	2,14	159,84
Hueco O V13	3,6	2,8	0,66	2,14	216,33
Hueco O V14	0,96	2,8	0,66	2,14	57,69
Hueco O V15	1,92	2,8	0,66	2,14	115,38
Hueco O V16	1,7	2,8	0,66	2,14	102,16

Tabla 30: Resumen de ahorros energéticos por el cambio de ventanas

Una vez analizados todos los huecos de la vivienda, se confirma que las ventanas actuales presentan unas transmitancias muy elevadas (2,8 W/m²·K), lo que contribuye de forma importante a las pérdidas energéticas del inmueble. La sustitución por modelos de triple acristalamiento con $U = 0,66$ W/m²·K permitiría reducir de forma considerable dichas pérdidas, mejorando además la estanqueidad y el confort térmico. El ahorro energético total estimado asciende a 2355,58 kWh/año, lo que supone un ahorro en energía térmica demandada para calefacción del 7,46% sobre el total.

Teniendo en cuenta que se trata de una intervención directa sobre una superficie relativamente pequeña, la mejora de las ventanas se presenta como una solución muy efectiva y de fácil instalación.

3.3 Medidas en el lado del suministro y ahorros energéticos asociados

Una vez analizadas las distintas estrategias destinadas a reducir la demanda energética de la vivienda, tanto térmica como eléctrica, es momento de estudiar otro aspecto clave en cualquier estudio de eficiencia energética, las medidas relacionadas con el suministro de energía. Mientras que en el bloque anterior se actuaba sobre la envolvente y el comportamiento pasivo del edificio, en este apartado el objetivo es optimizar el suministro de energía que realmente se consume en el inmueble.

El consumo final de energía de una vivienda no depende únicamente de su demanda teórica, sino también del rendimiento de los sistemas que se encargan de cubrir dicha demanda. Por ejemplo, una instalación de calefacción poco eficiente, como una caldera antigua sin condensación, puede requerir mucha más energía para proporcionar la misma cantidad de calor útil que un sistema moderno de alto rendimiento. Lo mismo ocurre con la electricidad, además de ser posible reducir el uso de equipos o la iluminación, también se puede actuar sobre el origen de esa electricidad, produciéndola localmente mediante fuentes renovables como los sistemas fotovoltaicos.

Por tanto, las medidas de este apartado se centran en reducir el consumo energético actuando directamente sobre los sistemas de generación y suministro, ya sea a través de la incorporación de energías renovables, la mejora del rendimiento de los equipos térmicos existentes o la instalación de sistemas más eficientes para calefacción, refrigeración o agua caliente sanitaria (ACS). Además de permitir una reducción directa del consumo, estas estrategias contribuyen a disminuir las emisiones asociadas al uso de energía, a aumentar la autonomía del hogar respecto a la red, y a obtener beneficios económicos a medio-largo plazo (se estudiará en el próximo apartado).

A lo largo de este bloque se analizarán de forma independiente las principales alternativas para mejorar el suministro eléctrico y térmico de la vivienda. Se evaluará su impacto

energético con el fin de plantear un conjunto de soluciones coherentes y complementarias a las ya adoptadas en el lado de la demanda.

3.3.1 Medidas en el lado del suministro eléctrico

Dentro del ámbito del suministro eléctrico, una de las estrategias más eficaces y populares en los últimos años es la instalación de sistemas de autoconsumo mediante energía solar fotovoltaica. Esta medida permite a la vivienda generar parte de su propia electricidad a partir de una fuente renovable, reduciendo así la energía comprada a la red, el impacto ambiental y la factura eléctrica.

Además de la generación fotovoltaica, también existen otras formas de optimizar el suministro eléctrico, como la incorporación de baterías para almacenamiento o sistemas de gestión inteligente del consumo. No obstante, en este estudio se pondrá el foco en el análisis del potencial de autoconsumo fotovoltaico en la vivienda objeto de estudio, valorando el ahorro energético asociado.

3.3.1.1 Instalación de sistema fotovoltaico sin acumulación

Una de las formas más accesibles y rentables de mejorar el suministro eléctrico en una vivienda es mediante la instalación de un sistema de autoconsumo fotovoltaico sin baterías, también conocido como sistema de autoconsumo con vertido a red. Este tipo de instalación consiste en colocar paneles solares en la cubierta del inmueble para generar electricidad durante las horas de sol, que se consume directamente en la vivienda en tiempo real. La energía que no se utiliza en el momento se vierte a la red eléctrica, compensándose económicamente en la factura mediante el mecanismo de compensación simplificada.



Figura 28: Paneles fotovoltaicos

Fuente: Repsol

Este tipo de sistemas son especialmente adecuados en viviendas donde existe un consumo eléctrico relativamente estable durante el día, y permiten reducir de forma significativa la energía comprada a la red, sin necesidad de realizar una inversión adicional en acumuladores o sistemas de gestión complejos. Aunque no permite almacenar excedentes para la noche, su sencillez, bajo mantenimiento y rápida amortización lo convierten en una opción muy atractiva desde el punto de vista técnico y económico.

En el caso concreto de esta vivienda, se analizará el potencial de instalar un sistema fotovoltaico dimensionado en función de la superficie útil disponible en cubierta y del perfil de consumo eléctrico, estimando su producción anual, el autoconsumo directo y la energía excedentaria. Además, se calculará el ahorro energético total, tanto en términos de electricidad no consumida de la red como en la reducción de emisiones asociadas.

Para estimar el potencial de generación fotovoltaica en la vivienda, el primer paso es analizar la superficie útil disponible en cubierta para la colocación de los paneles solares. En este caso, se dispone de una cubierta inclinada orientada al sur con una superficie de aproximadamente 52,91 m², lo que representa un espacio adecuado para la instalación de un sistema de autoconsumo residencial de tamaño medio. Teniendo en cuenta que cada panel fotovoltaico estándar ocupa en torno a 1,8 m², y considerando además las separaciones necesarias entre filas, los accesos de mantenimiento y los márgenes constructivos, se estima que es técnicamente viable instalar hasta 16 módulos solares de forma segura y eficiente.

Esta cantidad se adapta a las características del tejado y permite una integración adecuada sin comprometer la funcionalidad de la cubierta.

Si se utilizan módulos de potencia estándar, de unos 450 Wp, la potencia total instalada sería de:

$$P_{total} = 16 \text{ paneles} * 450 \text{ Wp} = 7,2 \text{ kWp}$$

Este valor representa la potencia pico máxima del sistema propuesto, y servirá como base para estimar su producción energética anual.

La producción fotovoltaica depende en gran medida de la radiación solar incidente sobre los paneles, la cual varía en función del mes, la orientación y la inclinación. En la figura 29 se representa la irradiación mensual recibida en Madrid sobre una superficie horizontal (0°) y sobre una superficie inclinada 30°, que se considera óptima para captación anual.

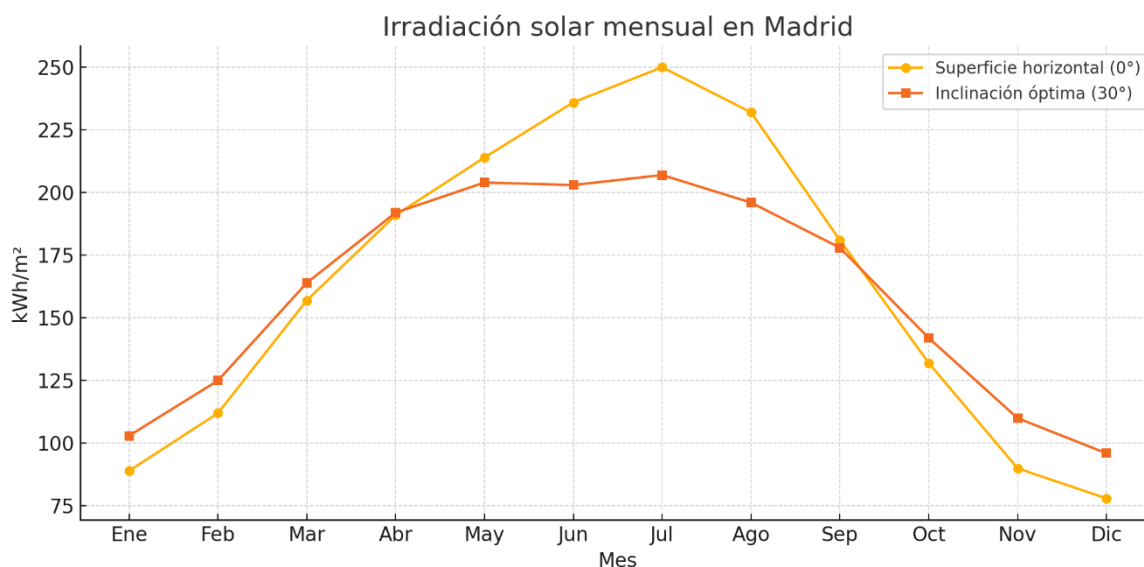


Figura 29: Irradiación solar mensual en Madrid según inclinación de los paneles

Datos fuente: [25].

Como se observa, durante los meses de verano la diferencia entre ambas inclinaciones es considerable, ya que el sol incide de forma más perpendicular sobre superficies horizontales. Sin embargo, en invierno la inclinación cobra mayor relevancia, incrementando notablemente la captación solar respecto a un tejado plano. Por tanto, utilizar una inclinación

cercana a 30° permite aprovechar mejor la radiación solar durante los meses fríos, cuando el sol está más bajo en el cielo y la necesidad de energía para calefacción es mayor. Esto resulta especialmente relevante en climas como el de Madrid, donde los inviernos son fríos y existe una importante demanda térmica estacional, lo que hace que una buena orientación e inclinación de los paneles tenga un impacto considerable en la producción energética útil.

Para entender mejor cómo afecta la posición del sol a lo largo del año en la producción de energía solar, en la figura 30 se muestra un esquema del recorrido solar en verano y en invierno. Como se ve en la imagen, durante el verano el sol está mucho más alto en el cielo, mientras que en invierno su trayectoria es más baja. Esto hace que, en los meses fríos, los rayos solares incidan de forma más directa sobre paneles que están bien inclinados hacia el sur. Este detalle es muy importante en zonas como Madrid, donde el consumo de calefacción en invierno es elevado, ya que permite aprovechar mejor la energía solar justo cuando más se necesita.



Figura 30: Dirección del sol en verano e invierno y su incidencia sobre los paneles solares.

Fuente: Tecnosolab

Para estimar la producción mensual de energía de la instalación fotovoltaica propuesta, se ha utilizado el software PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), desarrollado por el Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea [26]. Esta herramienta permite calcular la producción solar prevista en función de la ubicación, inclinación, orientación, potencia del sistema y pérdidas. En este caso, se ha simulado una instalación de 7,2 kWp ubicada en Madrid, con una inclinación de 30° , orientación sur (0°) y pérdidas del 14%.

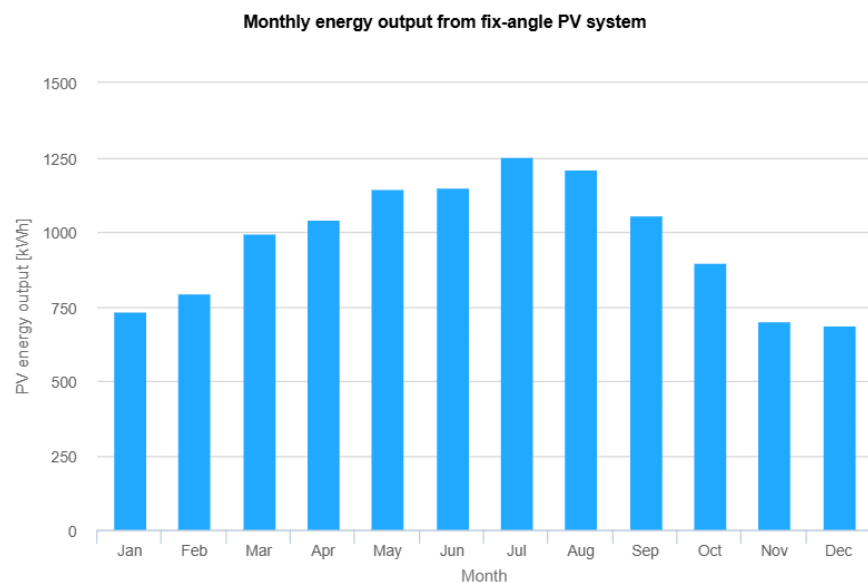


Figura 31: Producción mensual estimada de una instalación fotovoltaica de 7,2 kWp en Madrid

En la Tabla 31 se muestran los valores mensuales de producción eléctrica del sistema fotovoltaico propuesto, correspondientes a los datos representados en la gráfica anterior. Esta tabla permite observar de forma más precisa cómo varía la generación a lo largo del año, destacando los meses de mayor rendimiento como abril, mayo, junio y julio, y los mínimos en invierno. Esta información será clave para analizar el autoconsumo, los excedentes y el comportamiento energético del sistema.

Mes	Producción estimada (kWh)
Enero	665
Febrero	765
Marzo	980
Abril	1080
Mayo	1170
Junio	1120
Julio	1145
Agosto	1105
Septiembre	990
Octubre	835
Noviembre	670
Diciembre	585
Total	11110

Tabla 31. Producción mensual estimada del sistema fotovoltaico

Dado que en este apartado se analiza un sistema fotovoltaico sin baterías, toda la energía generada por los paneles que no se consume en el momento debe ser vertida a la red. Esto implica que, desde el punto de vista del ahorro energético en la vivienda, solo se puede contabilizar la energía que se autoconsume directamente, es decir, aquella que sustituye a la electricidad que se habría comprado a la red.

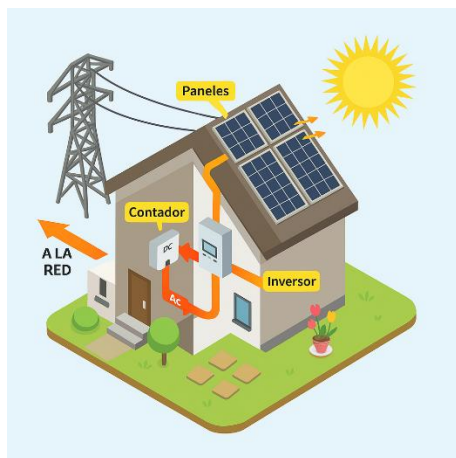


Figura 32: Esquema de instalación fotovoltaica sin baterías

Fuente: Elaboración propia mediante herramienta de generación de imágenes asistida por IA

En instalaciones de este tipo y teniendo en cuenta la vivienda que se está analizando, se puede asumir un 40 % de autoconsumo directo. Aplicando este porcentaje a la producción total anual del sistema (11110 kWh/año), se estima un ahorro energético real de aproximadamente 4444 kWh al año, lo que supone un 17,35% respecto del suministro eléctrico total. Este valor representa la cantidad de energía que efectivamente se deja de consumir de la red gracias al sistema fotovoltaico.

3.3.1.2 Instalación de sistema fotovoltaico con acumulación

Una vez analizado el comportamiento de una instalación fotovoltaica sin baterías, se plantea como alternativa la incorporación de un sistema de acumulación mediante baterías eléctricas. Este tipo de solución permite almacenar la energía generada durante el día que no se ha

podido consumir, para utilizarla posteriormente en las horas sin radiación solar, como por la noche o en momentos de baja producción.

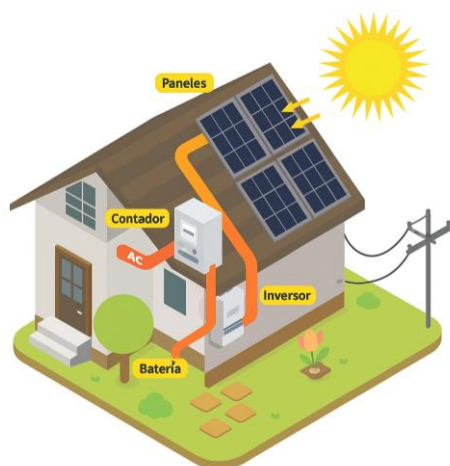


Figura 33: Esquema de instalación fotovoltaica con baterías

Fuente: Elaboración propia mediante herramienta de generación de imágenes asistida por IA

La principal ventaja de este sistema es que incrementa mucho el porcentaje de autoconsumo, ya que reduce la necesidad de verter excedentes a la red. En lugar de perder esa energía, se aprovecha más tarde dentro de la propia vivienda, lo que mejora tanto la eficiencia energética como el grado de autosuficiencia. Aunque implica una mayor inversión inicial, la incorporación de baterías permite ajustar mejor la producción solar al perfil de demanda eléctrica del hogar.

En este apartado se analizará el ahorro energético que tendría incorporar una batería a la instalación ya planteada, evaluando el incremento del autoconsumo y el nuevo ahorro energético total estimado.

Para cuantificar el impacto energético de incorporar un sistema de acumulación, se ha considerado una batería de litio del tipo Powerwall 2, con una capacidad útil de 13,5 kWh, lo cual permite almacenar parte de la energía solar que no se consume durante el día para usarla en momentos de baja producción, como por la noche. Este tipo de baterías ofrece una buena relación entre capacidad, durabilidad y facilidad de instalación, y puede integrarse tanto en interior como en exterior.

Parámetro	Valor
Tecnología	Litio-ion (NMC)
Capacidad útil	13,5 kWh
Potencia nominal de descarga	5 kW
Eficiencia de ida y vuelta	0,9
Tensión nominal	230 V
Dimensiones (Al x An x Pr)	1150 x 753 x 147 mm
Peso	114 kg
Número de ciclos (80% DoD)	5000 ciclos
Temperatura de operación	-20 °C a 50 °C
Instalación	Pared o suelo

Tabla 32: Características de la batería Powerwall 2

Fuente: [27].

Según estimaciones de organismos como el IDAE y fabricantes de soluciones de almacenamiento doméstico [28], la incorporación de una batería de litio bien dimensionada puede elevar el autoconsumo hasta valores próximos al 80 %, lo que representa un salto significativo respecto al rendimiento de una instalación sin acumulación.

En la Tabla 33 se muestra una comparativa entre las dos configuraciones analizadas: una instalación fotovoltaica sin acumulación y otra con batería. Como se puede observar, aunque la producción total de energía es la misma en ambos casos (11110 kWh/año), la incorporación de un sistema de almacenamiento permite incrementar considerablemente el porcentaje de autoconsumo, pasando de un 40 % a un 80 %. Esto se traduce en un aumento del ahorro energético real, ya que más energía generada se aprovecha directamente dentro de la vivienda, alcanzando hasta 8888 kWh/año de consumo cubierto gracias al sistema.

Parámetro	Sin batería	Con batería
Producción total (kWh/año)	11110	11110
Autoconsumo (%)	40%	80%
Ahorro energético (kWh/año)	4444	8888

Tabla 33: Comparativa del ahorro energético anual entre una instalación fotovoltaica con y sin baterías

Como se muestra en la Tabla 33, al incorporar un sistema de almacenamiento, el aprovechamiento de la producción solar aumenta de forma contundente, permitiendo cubrir hasta el 80 % del consumo eléctrico anual con energía generada en la propia vivienda. Esto se traduce en un ahorro energético de 8888 kWh/año (un 34,71% sobre el total del suministro eléctrico de la vivienda), lo que representa una mejora muy considerable en términos de eficiencia y autosuficiencia. Por tanto, la incorporación de baterías no solo permite reducir el volumen de excedentes vertidos a la red, sino que también maximiza el uso real de la energía solar producida, haciendo la instalación mucho más eficiente desde el punto de vista energético.

3.3.1.3 Aprovechamiento de baterías de vehículos eléctricos mediante tecnología V2H

Además de las soluciones clásicas de almacenamiento estacionario mediante baterías, en viviendas donde ya existen uno o más vehículos eléctricos, una alternativa muy interesante es el uso de su batería como sistema de apoyo al suministro eléctrico mediante tecnologías V2H (Vehicle-to-Home o Vehicle-to-Grid).

Esta tecnología permite que la batería del coche no solo se cargue desde la vivienda, sino que también pueda descargar energía hacia la red doméstica, funcionando como una batería auxiliar. En otras palabras, el coche eléctrico actúa como almacén de energía móvil, capaz de cubrir parte de la demanda del hogar en momentos donde no hay producción solar.

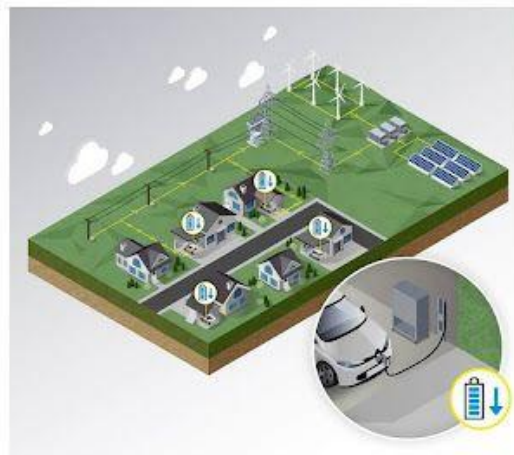


Figura 34: Ejemplo de tecnología V2H

Fuente: Renault

En esta vivienda se dispone de vehículos eléctricos con batería, lo que hace viable la implantación de un sistema V2H. En condiciones adecuadas y con un cargador bidireccional compatible, se puede utilizar la batería del coche para reducir la energía comprada a la red, o incluso para aplanar picos de demanda nocturnos que normalmente no podrían cubrirse con energía solar directa.

Por ejemplo, un vehículo eléctrico medio con una batería de 50 kWh podría aportar energía al hogar durante varias horas sin comprometer su autonomía diaria, especialmente si se recarga con energía solar durante el día. Esta estrategia permite aumentar el grado de autoconsumo sin necesidad de instalar baterías adicionales fijas, aprovechando una infraestructura que ya está disponible.

En una vivienda con varios vehículos híbridos enchufables, como es el caso, resulta especialmente interesante considerar la integración de la tecnología V2H como una herramienta adicional de apoyo al suministro eléctrico. Esta solución permite extender el sistema de almacenamiento más allá de una batería fija, aprovechando una infraestructura ya presente en el día a día del hogar. En la Tabla 34 se muestran las capacidades de los tres vehículos disponibles en la vivienda y la energía útil que podrían aportar a la red doméstica en caso de usar esta tecnología.

Vehículo	Capacidad batería (kWh)	Energía útil estimada (60%) (kWh)
Coche 1	13	7,8
Coche 2	13	7,8
Coche 3	25,9	15,54
Total	51,9	31,14

Tabla 34: Capacidad total y energía útil estimada disponible para uso doméstico mediante tecnología V2H.

Tal y como se muestra en la tabla, los tres vehículos suman una capacidad total de 51,9 kWh. No obstante, no se puede descargar la batería por completo, ya que los vehículos necesitan

mantener autonomía para los desplazamientos diarios y para preservar su vida útil. Por ello, se ha estimado que se podría utilizar un 60 % de la capacidad total, lo que equivale a 31,1 kWh útiles diarios. Este porcentaje es más conservador que en el caso de una batería fija, ya que los vehículos tienen una prioridad de uso en movilidad, y su disponibilidad para alimentar la vivienda puede variar. Aun así, esta cantidad de energía permitiría cubrir una parte considerable del consumo por la noche o en días de baja producción solar, aumentando significativamente el aprovechamiento de la energía generada y reduciendo la dependencia de la red eléctrica.

En resumen, aprovechar las baterías de los coches híbridos enchufables que ya hay en la vivienda mediante tecnología V2H es una forma muy inteligente de reforzar el sistema fotovoltaico sin tener que invertir en baterías fijas. En esta vivienda, los tres vehículos podrían aportar hasta 31,1 kWh útiles al día, lo que supone una ayuda importante para cubrir el consumo eléctrico durante la noche o en días sin sol.

Aunque este tipo de tecnología aún no está implantada en casi ningún hogar, su desarrollo está avanzando y todo apunta a que en poco tiempo será una opción habitual en viviendas con autoconsumo solar. Incorporar V2H no solo mejora el aprovechamiento de la energía generada, sino que reduce la dependencia de la red eléctrica y permite sacar más partido a una infraestructura que ya está disponible. Por eso, es una medida con mucho potencial para aumentar la eficiencia y la autonomía energética de la vivienda sin grandes complicaciones.

3.3.2 Medidas en el lado del suministro térmico

Una vez aplicadas medidas sobre la demanda térmica de la vivienda, como la mejora del aislamiento o la instalación de domótica, el siguiente paso lógico es actuar sobre el sistema que suministra el calor y el agua caliente. Estas medidas tienen como objetivo reducir el consumo energético necesario para cubrir las mismas necesidades térmicas, mejorando el rendimiento de los equipos actuales o sustituyéndolos por tecnologías más eficientes y sostenibles.

En este apartado se analizan propuestas orientadas a aumentar el rendimiento global del sistema de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS). Esto se puede conseguir, por un lado, mediante la sustitución de equipos convencionales por otros con mayor eficiencia, como las

calderas de condensación o bombas de calor. Por otro lado, también es posible incorporar fuentes de energía renovable, como los colectores solares térmicos, que permiten cubrir buena parte de la demanda de ACS sin necesidad de recurrir a combustibles fósiles.

Este tipo de medidas no solo reduce el consumo de energía final, sino que además disminuye la energía primaria no renovable utilizada por la vivienda, lo que impacta positivamente en el balance energético global del inmueble y en su calificación energética. Además, al tratarse de tecnologías maduras y probadas, su implementación es técnicamente viable y su rendimiento está ampliamente documentado.

En los siguientes apartados se detallarán dos medidas concretas: la sustitución de la caldera actual por un sistema más eficiente y la instalación de captadores solares térmicos para cubrir parte del ACS. Ambas se evaluarán desde el punto de vista técnico y energético, estimando los posibles ahorros asociados a su implantación.

3.3.2.1 Sustitución de la caldera por un sistema más eficiente

Uno de los elementos clave en el consumo térmico de una vivienda es la caldera, ya que es la encargada de generar el calor necesario para la calefacción y para el agua caliente sanitaria (ACS). En esta vivienda, la caldera existente es un modelo atmosférico antiguo, con un rendimiento estacional del 73 %, lo que implica que una parte considerable del gas consumido no se transforma en calor útil, sino que se pierde principalmente por los humos de combustión.

Este bajo rendimiento no solo incrementa el consumo de combustible, sino que también supone un funcionamiento menos eficiente y más contaminante. Por ello, se plantea su sustitución por una caldera de condensación, una tecnología que mejora notablemente el aprovechamiento de la energía contenida en el gas, gracias a la recuperación del calor presente en los vapores de los humos. Con este sistema, se pueden alcanzar rendimientos en torno al 105 % [29] (sobre PCI - Poder Calorífico Interior), lo que permite producir la misma cantidad de calor utilizando una menor cantidad de energía.

Como propuesta concreta para sustituir el equipo existente, se ha seleccionado la caldera Junkers Cerapur Acu Smart ZWSB 30-4E, un modelo de condensación altamente eficiente que combina una elevada potencia térmica con un acumulador integrado de 48 litros, lo

necesario para cubrir las necesidades de calefacción y ACS en viviendas unifamiliares. Este equipo ofrece un rendimiento estacional del 105 % sobre PCI, cuenta con clasificación energética Clase A y presenta un diseño compacto con bajas emisiones. En la Tabla 35 se muestran las principales especificaciones de la caldera en cuestión.

Parámetro	Valor
Modelo	Junkers Cerapur Acu Smart ZWSB 30-4E
Potencia térmica nominal (ACS/calefacción)	30 kW / 24 kW
Tipo de gas	Gas natural
Rendimiento estacional (PCI)	105 %
Capacidad del acumulador integrado	48 litros
Clase de eficiencia energética	Clase A
Dimensiones	890 x 600 x 480 mm
Peso	67 kg
Emisiones NOx	Clase 6 (bajas emisiones)

Tabla 35: Características de la caldera de condensación

En la Tabla 36 se resumen los resultados del análisis energético asociado al cambio de caldera. Se ha comparado el consumo actual, basado en una caldera con un rendimiento del 73 %, con el consumo que tendría una caldera de condensación como la Junkers Cerapur Acu Smart, que alcanza un rendimiento del 105 % sobre PCI. La tabla desglosa el cálculo en sus 2 usos principales, calefacción y agua caliente sanitaria (ACS). Del apartado de caracterización de la demanda energética de la parte térmica, se conoce que la demanda para calefacción es de 31577,75 kWh/año y la del agua caliente sanitaria es de 5058,5 kWh/año.

Servicio	Rendimiento caldera actual (%)	Rendimiento caldera nueva (%)	Consumo actual (kWht/año)	Consumo nuevo (kWht/año)	Ahorro energético (kWht/año)
Calefacción	73	105	43257,2	30074,0	13183,1
ACS	73	105	6929,5	4817,6	2111,8
Total	-	-	50186,6	34891,7	15295,0

Tabla 36: Comparativa caldera atmosférica vs condensación

Tal y como se muestra en la tabla, la mejora en eficiencia dada por el cambio de caldera tiene un impacto muy significativo en el consumo energético total de la vivienda. Con un rendimiento de la caldera actual del 73 %, el consumo total asciende a más de 50000 kWh/año para cubrir las necesidades de calefacción y ACS. Al colocar una caldera de condensación con un rendimiento del 105 %, esa cifra se reduce a algo menos de 35000 kWh/año, lo que supone un ahorro anual de 15295 kWh.

Este ahorro energético se reparte entre ambos servicios, la calefacción representa la mayor parte del ahorro (más de 13000 kWh), mientras que el ACS también aporta una reducción considerable de más de 2100 kWh anuales. Estos resultados confirman que el cambio de tecnología permite una optimización notable del sistema térmico sin alterar las condiciones de confort interior, únicamente mejorando el rendimiento del equipo que suministra dicha demanda energética.

3.3.2.2 Instalación de colectores solares térmicos para ACS

Dentro de las opciones disponibles para mejorar la eficiencia energética térmica de una vivienda, la instalación de colectores solares térmicos representa una de las soluciones más interesantes y sostenibles. Este tipo de sistemas permiten aprovechar la radiación solar para cubrir, total o parcialmente, la demanda de agua caliente sanitaria (ACS), reduciendo así el consumo de gas natural y la dependencia de fuentes de energía convencionales.

La tecnología solar térmica está ampliamente implantada en el sector residencial, y resulta especialmente adecuada para viviendas unifamiliares que cuentan con superficie disponible en cubierta y buena orientación, como es el caso de este inmueble. Su funcionamiento es sencillo y fiable: los colectores captan la energía del sol, transfieren el calor a un fluido caloportador y este, a su vez, lo cede al agua acumulada en un depósito. De este modo, se puede disponer de agua caliente sin necesidad de activar la caldera, especialmente en los meses de mayor radiación.



Figura 35: Cubierta con colectores solares instalados

Fuente: EcoInventos

En este apartado se plantea el dimensionamiento de un sistema de captación solar adaptado a las necesidades de la vivienda, con el objetivo de estimar el aporte solar anual, el porcentaje de cobertura de la demanda de ACS y el ahorro energético asociado. Esta actuación, combinada con la sustitución de la caldera, permite optimizar el sistema térmico del inmueble desde el punto de vista tanto técnico como energético.

Para mejorar la eficiencia energética de la vivienda y reducir el consumo de gas natural destinado a la producción de agua caliente sanitaria (ACS), se propone la instalación de colectores solares planos Vitosol 200-FM de Viessmann. La instalación se dimensiona con una superficie total de captación de 2,5 m², lo que equivale aproximadamente a un colector plano de este modelo, con una superficie útil cercana a los 2,3 m². La vivienda cuenta con espacio suficiente en cubierta, buena orientación y condiciones adecuadas para la captación solar, por lo que este tipo de sistema resulta perfectamente viable desde el punto de vista técnico.

Según datos de la ficha técnica del fabricante, estos colectores presentan un rendimiento global del 59 % bajo condiciones medias de funcionamiento, lo que se ha tomado como valor de referencia para este cálculo. Además del rendimiento, se necesita el valor de la radiación solar en el lugar donde se ubica la casa, que según [30] es de entre 5,4 kWh/m² y 6,3 kWh/m² al día (se escoge el menor por ser más conservador); dándonos un valor de radiación solar anual de 1971 kWh/m².

$$Q_{solar} = A * G * \eta$$

$$Q_{solar} = 2,5 \text{ m}^2 * 1971 \frac{kWh}{m^2} * 0,59 = 3256,1 kWh$$

Con la instalación del sistema solar térmico dimensionado para la vivienda, se estima que los colectores solares podrían aportar una media anual de 3256,1 kWh de energía útil destinada a la producción de agua caliente sanitaria (ACS). Si se compara este valor con la demanda energética anual de ACS del inmueble, que asciende a 5058,5 kWh, se concluye que el sistema sería capaz de cubrir aproximadamente un 64,4 % de las necesidades totales.

Este nivel de cobertura representa un ahorro energético considerable, ya que reduce de forma directa el consumo de gas natural de la caldera. Además, el sistema permite aprovechar una fuente renovable, gratuita y abundante como es el sol, lo que no solo mejora la eficiencia del conjunto, sino que también contribuye a la descarbonización del consumo energético de la vivienda.

En definitiva, la incorporación de captadores solares térmicos para ACS se consolida como una medida eficaz, madura y de bajo mantenimiento, capaz de generar un impacto significativo tanto en el consumo como en la sostenibilidad del sistema térmico residencial.

3.4 Análisis de factibilidad de las alternativas

A lo largo del capítulo se han planteado diferentes medidas para reducir el consumo energético de la vivienda, tanto en el ámbito eléctrico como en el térmico. Estas actuaciones, aunque distintas en sí mismas, comparten un mismo objetivo, que es mejorar la eficiencia energética del inmueble sin comprometer el confort de los residentes. Los resultados obtenidos muestran que es posible alcanzar una reducción muy significativa del consumo total, actuando sobre elementos clave como la iluminación, los electrodomésticos, la generación térmica o la envolvente del edificio.

Sin embargo, el ahorro energético no es el único criterio a tener en cuenta. A la hora de priorizar o planificar la adopción de estas medidas, también es fundamental considerar la viabilidad de su implementación. Algunas propuestas requieren intervenciones mínimas, como cambiar bombillas o algún electrodoméstico poco eficiente, mientras que otras implican obras más complejas, como mejorar el aislamiento de fachadas o sustituir ventanas.

Esta variabilidad en la dificultad técnica puede influir notablemente en los tiempos de ejecución, los costes indirectos o incluso en la decisión de llevar a cabo o no ciertas medidas.

Por ello, en este apartado se presentan de forma estructurada los ahorros energéticos estimados para cada medida, además de su porcentaje de reducción respecto al consumo total de la vivienda (separado en térmico y eléctrico). Además, se comentará de forma cualitativa el nivel de complejidad asociado a su instalación, con el fin de proporcionar una visión más realista y práctica sobre su posible aplicación en la vivienda que se está analizando.

Medida	Ahorro energético (kWh/año)	Dificultad de implantación	% sobre consumo eléctrico total
Sustitución de iluminación a LED	2275,4	Baja	9,81%
Mejora en el uso de enchufes (domótica básica)	896,2	Media	3,50%
Sustitución de electrodomésticos (Etiqueta A)	1095,9	Media	4,28%
Instalación de placas fotovoltaicas	4444	Media	17,36%
Acumulación con baterías	8888	Alta	34,71%
Uso de vehículos enchufables (V2H)	11351,5 *	Alta	44,33%

Tabla 37: Medidas eléctricas y ahorro asociado

* El valor reflejado para esta medida no representa un ahorro energético como tal, ya que la energía no se deja de consumir, sino que se gestiona de forma más eficiente. La idea es

aprovechar las baterías de los vehículos híbridos enchufables para cargar durante las horas de menor coste energético (horas valle) y utilizar esa energía almacenada durante las horas punta, cuando el precio de la electricidad es más elevado. Esto permite optimizar la gestión de la energía en la vivienda, aunque el consumo total no se reduzca, sino que se desplaza en el tiempo.

Medida	Ahorro energético (kWh/año)	Dificultad de implantación	% sobre consumo térmico total
Zonificación mediante domótica	9145,4	Media	17,53%
Aislamiento de cubierta	593,3	Alta	1,14%
Aislamiento de fachadas	3218,9	Alta	6,17%
Aislamiento del suelo	603,1	Alta	1,16%
Sustitución de ventanas	2355,5	Alta	4,51%
Sustitución de caldera	15295	Media	29,31%
Instalación de colectores solares	3256,1	Media	6,24%

Tabla 38: Medidas térmicas y ahorro asociado

El análisis conjunto de las medidas propuestas permite observar un potencial de ahorro energético muy significativo, tanto en la parte eléctrica como en la térmica. Si se implementaran todas las medidas evaluadas, el consumo de energía de la vivienda se reduciría de forma contundente, con beneficios evidentes tanto a nivel económico como ambiental.

En el ámbito eléctrico, se alcanzarían ahorros superiores a los 13155 kWh/año (se han considerado paneles fotovoltaicos con acumulación), lo que supone una reducción del 53,3% respecto al consumo eléctrico total. Dentro de este bloque, las medidas más relevantes por su impacto son la instalación de placas fotovoltaicas con acumulación, ya que permiten generar y almacenar una parte considerable de la energía consumida, maximizando su aprovechamiento. También destaca el uso de vehículos enchufables mediante tecnología V2H que no se ha considerado en el ahorro energético anual, ya que no representa un ahorro energético directo, sino que permite desplazar el consumo hacia horas de menor coste.

En cuanto al ámbito térmico, las medidas analizadas permiten alcanzar un ahorro total de 34467,4 kWh/año, es decir, una reducción del 66,05% sobre el consumo térmico. Las actuaciones más destacadas en este caso son la sustitución de la caldera por una de condensación, con un ahorro superior al 29 %, y la zonificación mediante domótica, que reduce considerablemente la demanda al adaptar el uso de la calefacción según la ocupación real (17,53% del consumo total).

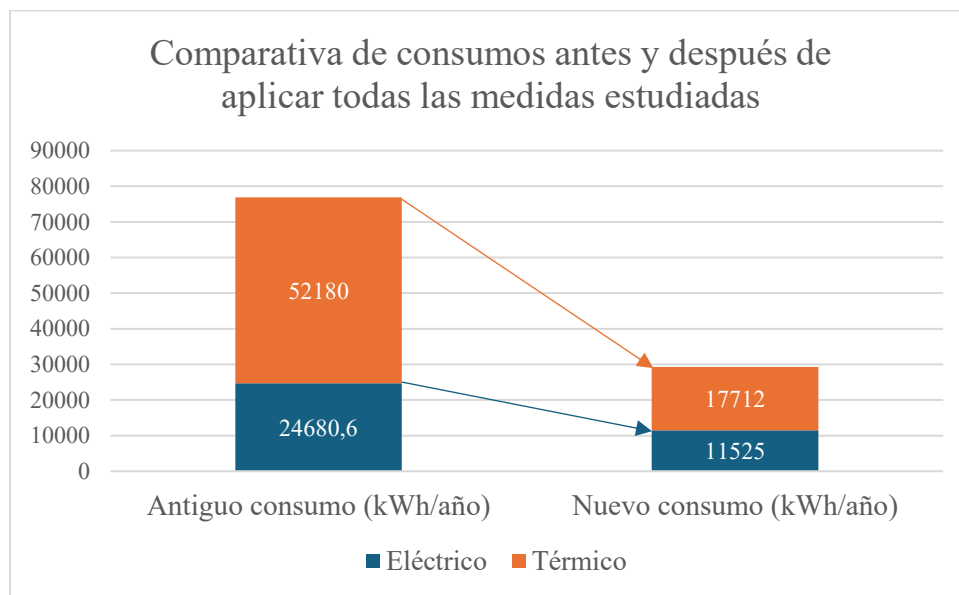


Figura 36: Consumos de la vivienda con y sin MAEs

La figura 36 ofrece una visión clara y directa del impacto global que tendrían las medidas de eficiencia energética analizadas a lo largo del capítulo. Se observa una reducción muy significativa del consumo, tanto en el apartado eléctrico como en el térmico. En concreto, el

consumo eléctrico desciende de 24680,6 kWh/año a 11525,1 kWh/año, mientras que el consumo térmico pasa de 52180 kWh/año a 17712,6 kWh/año.

Tipo de medida	Consumo actual (kWh/año)	Ahorro energético total (kWh/año)	Consumo con medidas (kWh/año)	Ahorro energético total (%)
Tipo eléctrico	24680,6	13155,5	11525,1	53,30%
Tipo térmico	52180	34467,4	17712,6	66,05%
TOTAL	76860,6	47622,9	29237,7	61,96%

Tabla 39: Resumen del ahorro energético total tras aplicar las medidas

Esto supone una reducción conjunta de casi el 62 % del consumo total de la vivienda, lo que se traduce en una reducción de 47622,9 kWh/año. Además del beneficio energético, estas medidas contribuyen a una mayor autonomía energética, una menor dependencia de combustibles fósiles y una importante disminución del impacto ambiental de la vivienda.

Este resultado confirma que una estrategia combinada, que actúe tanto sobre la demanda como sobre el suministro, permite transformar una vivienda convencional en un modelo mucho más eficiente y alineado con los objetivos de sostenibilidad actuales.

4. Análisis económico-financiero de las alternativas

Tras haber llevado a cabo un análisis detallado de la caracterización energética de la vivienda y haber propuesto una serie de medidas de ahorro y eficiencia energética (MAEs), en el presente capítulo se realizará la evaluación económico-financiera de dichas alternativas.

El objetivo es cuantificar económicamente los ahorros energéticos estimados en el capítulo anterior, analizar el coste de implantación de cada medida, y calcular indicadores financieros clave como el periodo de retorno de la inversión (Payback), el Valor Actual Neto (VAN) y otros parámetros que permitan valorar su rentabilidad.

Para ello, se abordarán de manera individualizada las distintas medidas propuestas, diferenciando entre actuaciones sobre el lado de la demanda (como la sustitución de iluminación o electrodomésticos, la mejora del aislamiento o la zonificación térmica) y medidas sobre el lado del suministro energético (como la instalación de sistemas fotovoltaicos o de colectores solares térmicos).

En cada caso, se realizará una estimación de la inversión inicial requerida, los ahorros energéticos generados, y el impacto que estos tienen en la reducción del gasto anual de la vivienda. Posteriormente, se calculará el tiempo necesario para recuperar la inversión y se analizará su viabilidad económica.

Además del análisis individual, se evaluará la viabilidad económica del conjunto de medidas como un proyecto global, teniendo en cuenta aspectos como las posibilidades de financiación existentes, las ayudas públicas a la eficiencia energética y la rentabilidad esperada a largo plazo. Finalmente, se elaborará un modelo financiero que integre todos los flujos de caja derivados de las inversiones y ahorros previstos, calculando indicadores como el flujo de caja libre del proyecto y el coste de capital (WACC), esenciales para analizar su viabilidad en términos financieros.

Este capítulo es una pieza clave del proyecto, ya que permitirá no solo priorizar las medidas más eficaces desde el punto de vista energético, sino también determinar cuáles son económicamente viables y recomendables de implementar en la vivienda analizada.

4.1 Introducción

En este capítulo se evaluará de forma detallada la viabilidad económica de las medidas de eficiencia energética propuestas, haciendo uso de tres indicadores financieros fundamentales: el Periodo de Retorno Simple (Payback), el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

El objetivo principal es determinar no solo la reducción energética que cada medida puede ofrecer, sino también su conveniencia económica a lo largo de la vida útil del proyecto, permitiendo establecer una base sólida para la priorización de inversiones.

Estos indicadores permiten medir y comparar, de forma objetiva, la rentabilidad y el atractivo financiero de cada actuación planteada, facilitando así la toma de decisiones en función de su eficiencia económica y de su impacto en el ahorro energético.

A continuación, se describen los conceptos fundamentales y sus fórmulas de cálculo:

- **Periodo de Retorno Simple (Payback):**

El Payback mide el tiempo necesario, medido en años, para recuperar la inversión inicial mediante los ahorros económicos anuales generados por la medida implantada.

Su fórmula es:

$$Payback = \frac{Inversión\ inicial}{Ahorro\ anual}$$

Un valor de Payback más bajo indica una recuperación más rápida de la inversión. Aunque es un indicador útil y de fácil interpretación, no considera el valor temporal del dinero ni los flujos de caja posteriores a la recuperación.

- **Valor Actual Neto (VAN):**

El VAN refleja la diferencia entre el valor actualizado de los flujos de caja futuros esperados y la inversión inicial. Se calcula descontando los ahorros anuales esperados a una tasa de descuento determinada (normalmente relacionada con el coste de oportunidad del capital).

Su fórmula es:

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

Donde:

- A_t = ahorro neto en el año t.
- r = tasa de descuento (coste de oportunidad)
- n = número de años de vida útil de la inversión

- C_0 = inversión inicial

Un VAN positivo indica que la inversión genera un valor añadido y, por tanto, es económicamente viable.

- **Tasa Interna de Retorno (TIR):**

La TIR es la tasa de descuento que iguala el valor actual de los flujos de caja futuros al coste de la inversión inicial, es decir, el tipo de interés que hace que el VAN sea igual a cero. Se obtiene resolviendo la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1 + TIR)^t} - C_0$$

Básicamente, si la TIR obtenida es superior al coste de capital o a la rentabilidad mínima exigida, la inversión es considerada rentable. Un proyecto con una TIR elevada será preferible frente a otros con TIRs más bajas, siempre que supere el umbral de rentabilidad mínimo establecido.

En el análisis que se desarrollará en este capítulo, se calcularán estos tres indicadores para cada medida propuesta, permitiendo establecer una comparativa objetiva y fundamentada de las alternativas. Esta metodología asegurará una toma de decisiones basada tanto en criterios energéticos como en fundamentos económicos, garantizando la optimización de los recursos destinados a la mejora de la eficiencia energética de la vivienda objeto de estudio.

4.2 Cálculo de ahorros y Payback

Para poder valorar económicamente cada una de las medidas propuestas, lo primero que se necesita es saber cuánto ahorro real van a generar.

En este apartado se realizará el cálculo de los ahorros energéticos anuales que se conseguirían implantando cada medida, tanto en electricidad como en gas natural. A partir de estos ahorros de energía, se traducirán los resultados a ahorros económicos, considerando los precios actuales de la electricidad y el gas.

Con esta información, se calculará el Periodo de Retorno Simple (Payback) de cada medida, que nos indica en cuántos años se recuperaría la inversión inicial gracias a los ahorros obtenidos.

Aunque el Payback es un dato sencillo y rápido de interpretar, también tiene limitaciones, ya que no tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo ni los ahorros que siguen generándose después de recuperar la inversión.

Por eso, este cálculo será solo el primer paso de un análisis económico más completo que incluirá en apartados posteriores otros indicadores como el VAN y la TIR. Este primer análisis nos servirá para identificar de forma rápida qué medidas son más interesantes y cuáles podrían descartarse por tener un retorno excesivamente largo.

4.2.1 Análisis económico del cambio de bombillas

Dentro de las medidas de eficiencia energética propuestas, una de las actuaciones más sencillas y rentables consiste en la sustitución de las bombillas actuales de la vivienda. En concreto, se propone reemplazar 21 bombillas incandescentes por bombillas LED de 9W y 26 bombillas halógenas por bombillas LED de 7W.

Esta medida busca aprovechar las ventajas que ofrece la tecnología LED, caracterizada por un consumo energético muy inferior y una vida útil mucho mayor respecto a las tecnologías tradicionales.

Para realizar el análisis económico, se han tomado como referencia los precios actuales de mercado de las bombillas LED, considerando un coste de 5 € por unidad para las bombillas de 9W y 4 € por unidad para las de 7W [30].

Teniendo en cuenta esto, el coste total de inversión en iluminación sería:

$$Inversión = 21 * 5 + 26 * 4 = 209 \text{ €}$$

Este importe representa una inversión muy asequible dentro del conjunto de medidas analizadas, lo que permite considerar su implementación como de muy baja barrera económica.

En cuanto al ahorro energético anual, se calculó en la caracterización previa que la sustitución de las bombillas supone una reducción de 2275,4 kWh de consumo eléctrico al año. Si se considera el precio medio del kWh eléctrico utilizado en este trabajo, 0,1472 €/kWh, calculado a partir del coste total anual de la factura por el consumo eléctrico de la vivienda, el ahorro económico anual asociado a este cambio sería:

$$2275,4 \text{ kWh} * 0,1472 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 334,9 \text{ €}$$

Una vez estimado el ahorro económico anual derivado de la sustitución de las bombillas, se procede a calcular el Periodo de Retorno Simple (Payback).

Dado que la inversión requerida para sustituir todas las bombillas es de 209 €, y el ahorro anual estimado es de 334,9 €, el Payback se obtiene dividiendo estos dos valores:

$$\text{Payback} = \frac{209\text{€}}{334,9 \text{ €/año}} = 0,63 \text{ años}$$

Esto significa que la inversión se amortiza completamente en menos de 1 año, lo que implica una recuperación extremadamente rápida y convierte a esta medida en una de las más atractivas desde el punto de vista económico.

Se ha calculado también el Valor Actual Neto (VAN) de la inversión a lo largo de un horizonte de 10 años. Este indicador considera el valor temporal del dinero y permite conocer cuánto valor económico genera la medida en términos actuales. Para ello, se ha aplicado una tasa de descuento del 4 %, que es un valor bastante conservador en estudios de eficiencia energética.

Aplicando la fórmula se obtiene:

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{334,9}{(1 + 0,04)^t} - 209 = 2507,3 \text{ €}$$

Esto nos da un VAN de 2507,3 €, lo que indica que, tras recuperar los 209 € invertidos, la medida genera 2507€ de beneficio neto en valor actual, lo que confirma que es una inversión altamente rentable y sostenida en el tiempo.

Finalmente, se calcula la Tasa Interna de Retorno (TIR). En este caso, dado que los flujos de ahorro son constantes (334,9 € al año durante 10 años) y la inversión inicial es baja (209 €), la TIR resultante es muy superior a la tasa de descuento utilizada, lo que indica que la actuación es altamente rentable.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{334,9}{(1 + TIR)^t} - 209$$

La TIR obtenida es del 160,23% anual, lo que demuestra que el retorno económico de esta medida es prácticamente inmediato (ya se ha visto con el Payback).

Esto, junto con el VAN elevado y el Payback inferior a medio año, confirma que la sustitución de la iluminación por tecnología LED debe considerarse una medida muy a tener en cuenta.

4.2.2 Análisis económico del cambio de electrodomésticos

Una de las actuaciones planteadas es la sustitución de los electrodomésticos principales de la vivienda por modelos más eficientes. Se propone cambiar el frigorífico, la lavadora, el lavavajillas y el horno por versiones actuales con etiqueta energética A, ya que los existentes presentan varios años de antigüedad y una eficiencia claramente mejorable.

La reducción de consumo estimada al realizar esta renovación es de 1095,9 kWh al año, una cifra considerable si se tiene en cuenta el peso de estos equipos en el total eléctrico de la vivienda.

El coste total de adquisición de los nuevos electrodomésticos asciende a 2050 €, según precios medios actuales del mercado para modelos con etiqueta energética A. Aplicando el precio medio de la electricidad usado en este trabajo (0,1472 €/kWh), el ahorro económico que se conseguiría sería de:

$$1095,9 \text{ kWh} * 0,1472 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 161,35 \text{ €}$$

Como se ha hecho anteriormente, se procede a calcular el Payback, el VAN y la TIR:

$$\text{Payback} = \frac{2050\text{€}}{161,35 \text{ €/año}} = 12,7 \text{ años}$$

El periodo de retorno simple se sitúa en 12,7 años. Se trata de un plazo considerable, lo que hace que esta medida no destaque por una recuperación rápida de la inversión.

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{161,35}{(1 + 0,04)^t} - 2050 = -741,31 \text{ €}$$

El Valor Actual Neto obtenido es negativo. Esto indica que, a 10 años y con una tasa de descuento del 4 %, la inversión no consigue recuperar el capital aportado por la compra de dichos electrodomésticos.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{161,35}{(1 + TIR)^t} - 2050$$

La Tasa Interna de Retorno se sitúa en el -4,13 %, la inversión implica una pérdida anual media del 4,13 %.

Desde el punto de vista estrictamente económico, esta medida no resulta atractiva ni a corto ni a largo plazo, ya que presenta un VAN negativo de -741,31 € y una Tasa Interna de Retorno del -4,13 %, lo que indica una pérdida económica a lo largo del tiempo.

4.2.3 Análisis económico de la implantación de sistemas de control y automatización en el hogar

Se plantea la instalación de sensores de presencia y enchufes inteligentes con el objetivo de reducir consumos innecesarios, automatizar ciertos usos eléctricos y mejorar el control sobre el gasto energético diario. Estos dispositivos permiten apagar automáticamente luces o aparatos cuando no se detecta presencia y gestionar el funcionamiento de equipos de forma remota o programada.

Según el análisis realizado en el capítulo 3, esta medida permite un ahorro energético anual de 896,21 kWh.

Aplicando el precio medio de la electricidad utilizado en este trabajo (0,1472 €/kWh), el ahorro económico anual sería de 131,92 €.

$$896,21 \text{ kWh} * 0,1472 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 131,92 \text{ €}$$

El coste de la medida asciende a 95,94 €, considerando la instalación de 2 sensores de presencia (27,99 € cada uno [31]) y 4 enchufes inteligentes (9,99 € cada uno [32]). Todos los dispositivos son de instalación sencilla, sin necesidad de intervención profesional.

Como se ha hecho anteriormente, se procede a calcular el Payback, el VAN y la TIR:

$$Payback = \frac{95,94\text{€}}{131,92 \text{ €/año}} = 0,73 \text{ años}$$

La inversión se recupera en poco más de 8 meses, lo que sitúa esta medida entre las más rentables y rápidas de amortizar.

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{131,92}{(1 + 0,04)^t} - 95,94 = 974,07 \text{ €}$$

El Valor Actual Neto es muy elevado en comparación con la inversión, lo que demuestra que esta medida genera un valor económico muy significativo a lo largo de su vida útil.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{161,35}{(1 + TIR)^t} - 95,94$$

La Tasa Interna de Retorno supera el 130 %, lo que confirma la altísima rentabilidad financiera de esta actuación.

4.2.4 Análisis económico de la sustitución de ventanas

Una de las medidas más relevantes para reducir la demanda térmica de la vivienda es la sustitución de las ventanas actuales por modelos más eficientes, concretamente ventanas de PVC con doble acristalamiento. Este tipo de cerramiento mejora significativamente el aislamiento térmico, reduciendo tanto las pérdidas de calor en invierno como las ganancias de calor en verano.

La superficie total de ventanas a sustituir es de 39,2 m², según se detalla en el capítulo anterior. El precio medio estimado para este tipo de ventanas, incluyendo suministro e instalación, es de 281,25 €/m² [33], lo que supone un coste total de 11025 € para toda la actuación.

El ahorro energético anual asociado a esta medida es de 2355,58 kWh, de acuerdo con el análisis energético realizado en el capítulo 3.

Aplicando el precio medio del gas utilizado en este trabajo (0,044324 €/kWh), el ahorro económico anual sería de:

$$2355,58 \text{ kWh} * 0,044324 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 104,44 \text{ €}$$

Como se ha hecho anteriormente, se procede a calcular el Payback, el VAN y la TIR:

$$Payback = \frac{11025\text{€}}{104,44 \text{ €/año}} = 105,56 \text{ años}$$

Este periodo de retorno extremadamente largo indica que la medida no es rentable económicamente a precios actuales del gas.

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{104,44}{(1 + 0,04)^t} - 11025 = -10170,03 \text{ €}$$

El VAN fuertemente negativo muestra que la inversión no se recupera en absoluto dentro del horizonte de análisis.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{104,44}{(1 + TIR)^t} - 11025$$

La Tasa Interna de Retorno también es negativa (TIR = -13,6 %), lo que confirma que esta actuación no es rentable desde el punto de vista financiero en el plazo considerado.

En resumen, aunque la sustitución de ventanas mejora notablemente el aislamiento térmico y el confort de la vivienda, y tiene efectos positivos sobre la demanda energética, desde una perspectiva puramente económica esta medida no resulta rentable.

4.2.5 Análisis económico de la zonificación mediante domótica

La zonificación térmica mediante domótica permite dividir la vivienda en distintas zonas independientes para gestionar de forma diferenciada la calefacción o el aire acondicionado. Esto permite climatizar únicamente las estancias que se están utilizando, evitando consumos innecesarios y mejorando el confort térmico. Se trata de una solución muy útil en viviendas de gran tamaño o con ocupación variable a lo largo del día.

Según los cálculos realizados en el capítulo 3, esta medida permitiría un ahorro energético anual de 9145,44 kWh. Aplicando el precio medio de la electricidad empleado en este trabajo (0,1472 €/kWh), se obtiene un ahorro económico anual estimado de:

$$9145,44 \text{ kWh} * 0,044324 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 405,21\text{€}$$

El coste de implantación de un sistema de zonificación domótica puede oscilar entre 300 y 2000 € [34], dependiendo del número de estancias, el tipo de control (inalámbrico o cableado), y el grado de integración con otros sistemas del hogar. En este caso, al tratarse de una vivienda grande, se considera un coste estimado de 2000 €.

Como se ha hecho en los puntos de arriba, se procede a calcular el Payback, el VAN y la TIR:

$$\text{Payback} = \frac{2000\text{€}}{405,21 \text{ €/año}} = 4,94 \text{ años}$$

La inversión se recupera en aproximadamente 5 años, lo que convierte esta medida en una de las más atractivas del conjunto a tener en cuenta.

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{405,21}{(1 + 0,04)^t} - 2000 = 1279,18\text{€}$$

El Valor Actual Neto es muy elevado, lo que confirma que esta medida no solo se amortiza con rapidez, sino que también genera un valor económico importante en el largo plazo.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{405,21}{(1 + TIR)^t} - 2000$$

La Tasa Interna de Retorno (10,5%) supera por mucho la tasa de descuento aplicada, lo que implica una excelente rentabilidad financiera.

En resumen, la zonificación mediante domótica ofrece un ahorro energético considerable con una inversión razonable y un retorno económico muy favorable. Es una medida especialmente recomendable para viviendas de gran superficie, donde el control independiente de habitaciones tiene un gran impacto en la eficiencia y el confort.

4.2.6 Análisis económico de la mejora del aislamiento térmico de la envolvente

La mejora del aislamiento térmico de la envolvente es una de las medidas más eficaces para reducir la demanda energética de la vivienda. En este caso, se actúa sobre las fachadas, la cubierta y el suelo, aplicando técnicas y materiales específicos en cada elemento constructivo.

Las superficies a intervenir han sido determinadas a partir del análisis de las distintas partes del capítulo 3, y son las siguientes:

- Fachadas: 212,87 m²
- Suelo: 115,21 m²
- Cubierta: 98,48 m²

Para cada zona se ha considerado un sistema de aislamiento adecuado, con los siguientes precios de mercado:

- Fachadas → Sistema SATE: 71,87 €/m² [35]
- Suelo → Aislamiento sobre forjado: 19,45 €/m² [36]
- Cubierta → Panel tipo sándwich: 10,70 €/m² [37]

Con estos valores, el coste total de la actuación se calcula como:

$$\text{Coste total} = 71,87 * 212,87 + 19,45 * 115,21 + 10,70 * 98,48 = 18593,54 \text{ €}$$

Según el análisis energético realizado en el capítulo 3, la aplicación conjunta de estas tres medidas permite un ahorro energético anual total de 4415,29 kWh, que aplicando el precio medio de la electricidad empleado en este trabajo (0,044324 €/kWh), se obtiene un ahorro económico anual de:

$$4415,29 \text{ kWh} * 0,044324 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 195,74 \text{ €}$$

Ahora, como se viene haciendo a lo largo de todo el capítulo, se procede a calcular el Payback, el VAN y la TIR:

$$\text{Payback} = \frac{18593,54 \text{ €}}{195,74 \text{ €/año}} = 94,96 \text{ años}$$

Este periodo de retorno extremadamente largo indica que la medida no se amortiza económicamente en un horizonte temporal razonable.

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{195,74}{(1 + 0,04)^t} - 18593,54 = -17302,63\text{€}$$

El Valor Actual Neto es negativo, lo que indica que la inversión no se recupera en un horizonte de 10 años.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{195,74}{(1 + TIR)^t} - 18593,54$$

La Tasa Interna de Retorno es de -13,1%, lo que confirma que, desde un punto de vista económico, la medida no es rentable en el medio plazo.

La mejora del aislamiento térmico presenta beneficios importantes en términos de confort, eficiencia y sostenibilidad, pero desde una perspectiva exclusivamente económica y con los precios actuales del gas natural, no es una inversión rentable. Su implementación podría justificarse dentro de una estrategia integral de rehabilitación energética, especialmente si se dispone de subvenciones o si se espera un aumento de los costes energéticos en el futuro.

4.2.7 Análisis económico de la instalación de placas fotovoltaicas

La instalación de un sistema fotovoltaico de autoconsumo permite reducir significativamente la factura eléctrica, aprovechando la producción solar para cubrir parte o la totalidad de la demanda energética de la vivienda. En este caso se plantea una instalación compuesta por 16 paneles solares de 450 Wp, que suman una potencia total de 7,2 kWp.

Cada panel tiene un coste de 177,85 € [38], por lo que el coste total de los paneles asciende a:

$$\text{Coste total} = 16 * 177,85 = 2845,6 \text{ €}$$

A este importe se le añade un coste estimado de 600 € en concepto de instalación, lo que eleva el coste total sin batería a 3445,60 €.

Además, se analiza un segundo escenario en el que se incluye una batería de acumulación, concretamente una Tesla Powerwall 2 con una capacidad útil de 13,5 kWh. El coste de esta batería es de 6414,21 € [39], lo que sitúa el coste total del sistema con batería en 9859,81 €.

En ambos casos, se ha considerado un gasto anual de mantenimiento de 180 €, correspondiente a revisiones, limpieza de los paneles y posibles actualizaciones del sistema. Este gasto se descuenta del ahorro energético bruto anual para obtener el ahorro económico neto real.

- **Opción 1: Instalación sin batería**

La producción anual estimada para esta instalación es de 4444 kWh, lo que supone un ahorro bruto de:

$$4444 \text{ kWh} * 0,1472 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 654,16 \text{ €}$$

Teniendo en cuenta el gasto de mantenimiento anual arriba mencionado, el ahorro neto anual es:

$$654,16 - 180 = 474,16 \text{ €}$$

- **Opción 2: Instalación con batería**

Con la incorporación de la batería, el aprovechamiento energético aumenta hasta 8888 kWh/año, lo que genera un ahorro bruto de:

$$8888 \text{ kWh} * 0,1472 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1308,31 \text{ €}$$

Descontando el mantenimiento, el ahorro neto anual es de:

$$1308,31 - 180 = 1128,31 \text{ €}$$

Una vez se tienen claras las opciones posibles, con sus respectivos ahorros netos y sus inversiones iniciales, se procede a calcular el TIR, Payback y el VAN:

Opción	Inversión inicial (€)	Ahorro energético (kWh)	Ahorro económico (€)	Payback (años)	VAN (€)	TIR (%)
Placas solares	3445,6	4444	474,16	7,27	580,26	7,27
Placas solares + Batería	9859,81	8888	1128,31	8,74	375,11	4,73

Tabla 40: Resumen de las posibles medidas de paneles

Ambas opciones resultan viables desde el punto de vista financiero, incluso teniendo en cuenta un mantenimiento anual de 180 €. La opción sin batería requiere una menor inversión y presenta una rentabilidad más rápida, mientras que la incorporación de acumulación mejora el aprovechamiento energético y la independencia de la red, aunque con un retorno algo más lento. En ambos casos, los resultados económicos podrían mejorar considerablemente si se dispone de subvenciones o si aumentan los precios de la electricidad.

4.2.8 Análisis económico de la implementación de tecnología V2H

Una alternativa innovadora y de gran potencial para mejorar la eficiencia energética de la vivienda consiste en integrar la tecnología V2H (Vehicle-to-Home), que permite utilizar las baterías de los vehículos híbridos enchufables como almacenamiento energético y fuente de alimentación para la vivienda. Este sistema no implica una reducción directa del consumo eléctrico, sino una gestión más eficiente de la energía, basada en el arbitraje entre periodos tarifarios.

La medida consiste en cargar los vehículos eléctricos durante las horas valle, cuando la electricidad tiene un coste más bajo, y utilizar esa energía almacenada para alimentar la vivienda durante las horas punta, cuando el precio de la electricidad es mucho más alto. De esta forma, se consigue un importante ahorro económico anual, sin reducir el confort ni alterar los hábitos de consumo.

Para implementar esta medida es necesario adquirir e instalar los siguientes equipos:

1. Cargador bidireccional Wallbox Quasar 2: permite tanto cargar el vehículo como extraer energía desde la batería hacia la vivienda.
 - Coste del equipo: 3995 € [40]
 - Coste de instalación y cableado: 1105 €
 - Coste total del cargador instalado: 5100 €
2. Sistema de gestión energética (EMS): compuesto por el SMA Energy Meter y el SMA Home Manager 2.0, este sistema actúa como el "cerebro energético" de la vivienda. Este sistema el que se encarga de detectar cuándo es más económico cargar o descargar los vehículos y de coordinar el uso de la batería según los patrones de consumo y tarifas horarias.
 - Coste del equipo EMS: 1050 € [41]
 - Coste de instalación: 200 €
 - Coste total del EMS: 1250 €
3. Adaptación eléctrica de la vivienda: reformas menores necesarias para integrar el sistema bidireccional con seguridad (cuadro, protecciones, etc.).
 - Coste estimado: 1000 €

La inversión inicial total necesaria para la implementación del sistema V2H asciende a 7350 €, desglosada en los siguientes elementos: cargador bidireccional (como el Wallbox Quasar 2) con un coste aproximado de 5100 €, un sistema de gestión energética (EMS) valorado en 1250 €, y la adaptación eléctrica de la vivienda para permitir la bidireccionalidad y el funcionamiento en modo isla, estimada en 1000 €. Además, se contempla un mantenimiento anual estimado de 180 € para garantizar el correcto funcionamiento y actualización del sistema.

Según lo analizado en el apartado 3.3.1.3, el sistema V2H podría gestionar 11351,5 kWh/año. Tomando como referencia los precios de la factura eléctrica (0,08921 €/kWh en valle y 0,18767 €/kWh en punta), el ahorro económico por arbitraje horario, es decir, por cargar en horas valle y descargar en horas punta, sería de:

$$\Delta \text{Precio} = 0,18767 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} - 0,08921 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0,09846 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Esto, genera un ahorro económico anual de:

$$\text{Ahorro bruto} = 11351,5 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * 0,09846 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1117,51 \text{ €}$$

A este ahorro, se le tiene que restar el mantenimiento de 180 € anuales, para poder así tener el flujo de caja neto, obteniéndose 937,51 €.

Como se ha hecho anteriormente, se procede a calcular el Payback, el VAN y la TIR:

$$\text{Payback} = \frac{7350 \text{ €}}{937,51 \text{ €/año}} = 7,84 \text{ años}$$

Este resultado indica que la inversión se recupera completamente en menos de ocho años, lo cual es aceptable considerando que la vida útil del sistema supera dicho periodo.

$$\text{VAN} = \sum_{t=1}^{10} \frac{937,51}{(1 + 0,04)^t} - 7350 = 1066,97 \text{ €}$$

El VAN positivo indica que la inversión es rentable y que genera valor neto adicional.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{937,51}{(1 + \text{TIR})^t} - 7350$$

La Tasa Interna de Retorno es de 6,4 %, lo que confirma que, la inversión es aceptable desde el punto de vista financiero.

El uso de la tecnología V2H en esta vivienda permitiría aprovechar los vehículos como sistemas de almacenamiento energético inteligente, ahorrando 1117,51 € al año gracias al arbitraje entre periodos horarios. A pesar de la inversión inicial moderada (7350 €), el sistema presenta un VAN positivo, una TIR superior al coste del capital, y se recupera en menos de 8 años. Además de ser rentable, mejora la autonomía energética del hogar, permite aprovechar recursos existentes (vehículos), y se puede complementar perfectamente con autoconsumo fotovoltaico.

4.2.9 Análisis económico del cambio de caldera

La sustitución de la caldera actual por una caldera de condensación más eficiente permite reducir considerablemente el consumo de gas natural para calefacción y agua caliente sanitaria. Las calderas de condensación aprovechan el calor latente de los humos de combustión, alcanzando rendimientos muy superiores a los de las calderas tradicionales, lo que se traduce en un importante ahorro energético.

Según los cálculos realizados en el capítulo 3, esta medida permitiría un ahorro energético anual de 15295 kWh. Como esta energía corresponde a gas natural, es necesario aplicar un precio realista del combustible. El precio del consumo del gas fluctúa mes a mes, por lo que se ha calculado una media ponderada de las facturas reales del inmueble, resultando en un valor de 0,044324 €/kWh. Este precio representa el coste medio real del kWh de gas consumido, sin incluir otros cargos fijos o impuestos.

Aplicando este precio, el ahorro económico anual estimado asciende a:

$$Ahorro = 15295 \frac{kWh}{año} * 0,044324 \frac{€}{kWh} = 678,06€$$

El coste de adquisición de la nueva caldera Junkers Cerapur Acu Smart ZWSB 30-4E es de 2357,45 € [42], a lo que se añaden 200 € de instalación, resultando en una inversión total de 2557,45 €.

Además de esto, se deben tener en cuenta un gasto de 80 € anuales en concepto de mantenimiento, quedando un ahorro neto de:

$$Ahorro\ neto = 2557,47 - 80 = 2477,45\ €$$

Como en los casos anteriores, se procede a calcular el Payback, el VAN y la TIR:

$$Payback = \frac{2477,45\ €}{678,06\ €/año} = 3,65\ años$$

Este resultado indica que la inversión se recupera completamente en menos de 4 años, lo cual es correcto considerando que la vida útil del sistema supera dicho periodo.

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{678,06}{(1 + 0,04)^t} - 2477,45 = 3111,44€$$

Un VAN positivo y elevado confirma que esta medida no solo se amortiza con rapidez, sino que genera valor económico a largo plazo.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{678,06}{(1 + TIR)^t} - 2477,45$$

La Tasa Interna de Retorno es de 18,1 %, lo que confirma que la inversión es muy buena desde el punto de vista financiero.

La sustitución de la caldera actual por una caldera de condensación es una de las medidas más eficientes y rentables del conjunto de actuaciones propuestas. Con una inversión moderada y un periodo de retorno inferior a 4 años, esta mejora permite reducir de forma significativa el consumo de gas natural y disminuir las emisiones contaminantes de la vivienda.

4.2.10 Análisis económico de la instalación de colectores solares

La instalación de colectores solares térmicos permite aprovechar la energía del sol para calentar el agua sanitaria de la vivienda, reduciendo la necesidad de utilizar gas natural para hacerlo. Se trata de una tecnología con bajo mantenimiento, que contribuye tanto al ahorro energético como a la descarbonización del sistema térmico de la vivienda.

Según los cálculos realizados en el capítulo 3, esta medida permitiría un ahorro energético anual de 3256,1 kWh, correspondiente a la energía térmica necesaria para la producción de agua caliente sanitaria (ACS). Dado que, sin este sistema, esta energía sería suministrada por la caldera de gas natural, el ahorro económico se calcula utilizando el precio medio del kWh de gas.

Como el precio del gas varía a lo largo del año, se ha realizado una media ponderada de las facturas reales de la vivienda, obteniéndose un valor representativo de 0,044324 €/kWh. Este valor refleja el coste real de la energía consumida (sin impuestos ni términos fijos) y se usa para estimar el ahorro que se obtiene al dejar de utilizar gas para calentar agua.

Aplicando este valor, el ahorro económico anual estimado es:

$$Ahorro = 3256 \frac{kWh}{año} * 0,044324 \frac{€}{kWh} = 144,24€$$

El coste total de la instalación (incluyendo captadores solares, acumulador, accesorios e instalación) se estima en 975 € [43].

Como en los casos anteriores, se procede a calcular el Payback, el VAN y la TIR:

$$\text{Payback} = \frac{975 \text{ €}}{144,24 \text{ €/año}} = 6,76 \text{ años}$$

Este resultado indica que la inversión se recupera completamente en menos de ocho años, lo cual es aceptable considerando que la vida útil del sistema supera dicho periodo.

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{144,24}{(1 + 0,04)^t} - 975 = 180,78\text{€}$$

El VAN positivo confirma que la medida es rentable a largo plazo, aunque con un margen más ajustado que otras alternativas.

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{144,24}{(1 + TIR)^t} - 975$$

La TIR es de 6,1%, lo que indica una rentabilidad aceptable para una solución que no requiere consumo energético ni mantenimiento relevante.

La instalación de colectores solares térmicos es una medida rentable y sostenible que permite reducir el consumo de gas natural para ACS mediante una fuente de energía gratuita y renovable. Aunque su retorno económico es más moderado que otras medidas, presenta una buena rentabilidad, baja inversión inicial, y contribuye significativamente a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sistema térmico de la vivienda.

4.3 Análisis de viabilidad económica de las medidas y su selección

En este apartado se realiza una evaluación conjunta y comparativa de todas las medidas analizadas a lo largo del capítulo 4. El objetivo es bastante claro: identificar cuáles de estas actuaciones resultan más interesantes y viables cuando se tienen en cuenta tanto los aspectos económicos como los funcionales. Es decir, ya no basta con saber si una medida reduce el consumo energético o mejora la eficiencia, sino que ahora toca mirar si realmente compensa

aplicarla, si vale la pena la inversión y en qué medida puede aportar beneficios a medio y largo plazo.

Para poder hacer esta valoración de forma objetiva y con datos en la mano, se han calculado tres indicadores clave que se utilizan habitualmente en estudios de rentabilidad de proyectos: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Payback o periodo de retorno de la inversión.

- El VAN nos permite saber cuál es el beneficio total (en valor presente) que genera cada medida a lo largo del tiempo, una vez descontados todos los costes iniciales y futuros. Si el VAN es positivo, en principio la inversión es rentable.
- La TIR nos dice la rentabilidad interna del proyecto. Es como el tipo de interés que iguala los ingresos y los costes del proyecto. Cuanto más alto sea, mejor.
- Y el Payback nos indica en cuántos años se recupera la inversión inicial. Aunque no tiene en cuenta los beneficios después del retorno, sí da una idea rápida del riesgo y del plazo de recuperación.

Todos estos indicadores se han calculado teniendo en cuenta un horizonte temporal de diez años, que se ha considerado razonable para este tipo de actuaciones, y se ha aplicado una tasa de descuento del 4 %, un valor bastante habitual que refleja el coste de oportunidad del dinero y el riesgo asociado al proyecto.

Este análisis económico permite comparar las distintas medidas en igualdad de condiciones y ver con claridad cuáles destacan por su buena relación coste-beneficio, cuáles se recuperan más rápido y cuáles generan más beneficios a largo plazo. Esta información será fundamental para el siguiente capítulo, donde se planteará una propuesta realista de implementación, priorizando aquellas actuaciones que tengan un mayor impacto positivo tanto en ahorro energético como en retorno económico.

Así, gracias a este enfoque, no solo se podrá justificar de forma técnica y económica cada decisión, sino también asegurar que los recursos disponibles se destinan a aquellas soluciones que realmente marcan la diferencia. En definitiva, se trata de tomar decisiones con cabeza, priorizando las medidas que más aportan y dejando para más adelante, o descartando,

aquellas que no compensan o que suponen un esfuerzo económico desproporcionado para el beneficio que aportan.

En la siguiente tabla se muestra un resumen con los resultados obtenidos para cada una de las diez medidas analizadas, incluyendo los valores de VAN, TIR y Payback. Esta tabla facilitará la comparación directa entre ellas y será la base para definir, en el siguiente capítulo, un plan de actuación bien estructurado, eficiente y ajustado a la realidad económica del proyecto.

Medida	Inversión inicial (€)	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)	Viabilidad económica
Cambio de bombillas por tecnología LED	209	2507,3	160,23	0,63	SÍ
Sustitución de electrodomésticos	2050	-741,31	-4,13	12,7	NO
Sistemas de control y automatización (stand-by)	95,94	974,07	130,8	0,73	SÍ
Sustitución de ventanas	11025	-10170	-13,6	105,56	NO
Zonificación térmica mediante domótica (gas)	2000	1279,18	10,5	4,94	SÍ
Mejora del aislamiento térmico de la vivienda	18593,54	-	-13,1	94,96	NO
Instalación de placas fotovoltaicas sin batería	3445,6	474,16	7,27	7,27	SÍ
Implementación de tecnología V2H (Vehicle-to-Home)	7350	1066,97	6,4	7,84	SÍ
Sustitución de la caldera por una de condensación	2557,45	3111,44	18,1	3,77	SÍ
Instalación de colectores solares térmicos	975	180,78	6,1	6,76	SÍ

Tabla 41: Indicadores económicos de las medidas de mejora energética propuestas

La Tabla 41 recoge los resultados más relevantes del análisis económico realizado para las diez medidas de mejora energética consideradas en este trabajo. En ella se presentan, de forma resumida, la inversión inicial estimada, el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de

Retorno (TIR) y el periodo de retorno o Payback, además de una valoración cualitativa final sobre su viabilidad económica.

Este conjunto de indicadores permite comparar las medidas bajo una perspectiva homogénea y objetiva, y extraer conclusiones fundamentadas sobre su implantación. El análisis se ha realizado considerando un horizonte de 10 años y una tasa de descuento del 4 %, coherente con los valores típicos de proyectos residenciales de eficiencia energética.

A partir del análisis económico realizado, las medidas de mejora energética se pueden clasificar en tres grandes grupos: aquellas altamente rentables, que presentan un rápido retorno de la inversión y una elevada tasa interna de retorno; un segundo grupo de medidas viables a medio plazo, que requieren una inversión mayor pero siguen mostrando resultados económicos positivos; y, por último, aquellas que resultan no viables económicamente dentro del horizonte de análisis considerado, debido a su elevada inversión frente a un ahorro energético limitado.

✓ **Medidas altamente rentables y de rápida amortización**

Varias medidas presentan una excelente rentabilidad económica y un periodo de recuperación muy corto. En concreto, el cambio de bombillas a tecnología LED muestra unos valores extraordinarios: una TIR del 160,23%, un VAN de 2507,3 € y un Payback inferior al año (0,63 años), todo ello con una inversión mínima de 209 €. Se trata de la medida más eficiente y prioritaria desde todos los puntos de vista.

También destacan los sistemas de control y automatización del consumo en stand-by, que por apenas 96 € de inversión ofrecen un VAN de 974,07 € y una TIR superior al 130 %, con un Payback de 0,73 años. Ambas actuaciones son de muy bajo coste, alta efectividad y fácil implantación, por lo que deberían abordarse de forma inmediata.

Otra medida destacada es la zonificación térmica mediante domótica aplicada al sistema de calefacción a gas, con un VAN positivo de 1279,18 €, una TIR del 10,5 % y un retorno de la inversión en menos de 5 años. Esta solución ofrece beneficios tanto energéticos como de confort y operatividad, con una inversión razonable, por lo que también se considera viable.

✓ **Medidas rentables a medio plazo con impacto estructural o tecnológico**

En un segundo grupo se encuentran las medidas con retornos más moderados, pero aún positivos, que implican inversiones algo mayores, pero también una transformación más significativa del sistema energético de la vivienda.

Es el caso de la instalación de placas fotovoltaicas sin batería, que con una inversión de 3445,60 €, genera un VAN positivo de 474,16 €, una TIR del 7,27 % y un Payback de 7,27 años. Si bien su periodo de retorno es mayor, la medida permite avanzar hacia la autosuficiencia energética y resulta atractiva en contextos de precios eléctricos crecientes o con acceso a subvenciones.

Lo mismo ocurre con la tecnología V2H (Vehicle-to-Home), que con una inversión de 7350 € ofrece un VAN de 1066,97 €, una TIR del 6,4 % y un Payback de 7,84 años. Aunque más compleja, esta medida aprovecha recursos ya disponibles (vehículos eléctricos) y puede integrarse con sistemas de autoconsumo, ofreciendo sinergias importantes en escenarios más avanzados.

Por último, la sustitución de la caldera por una de condensación representa una medida de alta eficiencia térmica y excelente rentabilidad: con una inversión de 2557,45 €, se obtiene un VAN de 3111,44 €, una TIR del 18,1 % y un Payback de 3,77 años. Esta actuación debería formar parte de cualquier estrategia de modernización de instalaciones térmicas.

La instalación de colectores solares térmicos, con una inversión modesta de 975 €, un VAN positivo (180,78 €) y una TIR del 6,1 %, también resulta viable, aunque su rentabilidad es más ajustada. Se trata de una buena medida de apoyo a la reducción del consumo de gas para ACS, especialmente si se combina con otras actuaciones.

✓ **Medidas no viables económicamente en el horizonte analizado**

Tres medidas han resultado no viables económicamente dentro del periodo de análisis de 10 años, presentando VAN negativo, TIR inferior al 4 % o incluso negativa, y periodos de retorno extremadamente largos.

La sustitución de electrodomésticos presenta una TIR de -4,13 % y un VAN negativo (-741,31 €), con un Payback superior a 12 años. Este resultado puede deberse a que los aparatos a sustituir todavía presentan eficiencia media-alta, o a que los costes considerados incluyen elementos no estrictamente amortizables en este horizonte.

La sustitución de ventanas, con una inversión de 11025 €, obtiene un VAN de -10170,03 €, una TIR de -13,6 % y un Payback de 105,56 años, lo que evidencia una clara inviabilidad desde el punto de vista económico.

La mejora del aislamiento térmico, con una inversión aún más elevada (18593,54 €), genera un ahorro térmico insuficiente para justificarla económicamente en 10 años. El VAN negativo (-17302,6 €) y la TIR de -13,1 % confirman que no se recupera la inversión en el plazo considerado, aunque puede ser recomendable desde un enfoque de rehabilitación integral o mejora del confort a largo plazo.

Este análisis económico permite clasificar con objetividad las medidas analizadas y establecer prioridades realistas. Las medidas con bajo coste y alto retorno (LED, control del stand-by, caldera) deben ser implementadas de forma prioritaria, mientras que aquellas con beneficios estratégicos y sinergias (fotovoltaica, V2H, colectores) pueden aplicarse si el presupuesto lo permite o con el apoyo de incentivos.

Por el contrario, medidas como ventanas, aislamiento o renovación de electrodomésticos, a pesar de su aportación energética y de confort, no resultan económicamente viables en las condiciones actuales y deben reservarse para fases futuras o contextos con subvenciones específicas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis económico (Tabla 41), se ha decidido seleccionar para su implementación todas aquellas medidas que presentan una viabilidad económica positiva, es decir, aquellas cuyo Valor Actual Neto (VAN) es mayor que cero, cuya Tasa Interna de Retorno (TIR) supera el 4 % y que recuperan la inversión dentro del horizonte de análisis de 10 años. Estas actuaciones combinan una buena rentabilidad con un impacto positivo sobre la eficiencia energética, por lo que se consideran técnicamente recomendables y económicamente sostenibles.

Las medidas seleccionadas se presentan en la siguiente tabla:

Medida	Inversión inicial (€)	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)
Cambio de bombillas por tecnología LED	209	2507,3	160,23	0,63
Sistemas de control y automatización (stand-by)	95,94	974,07	130,8	0,73
Zonificación térmica mediante domótica (gas)	2000	1279,18	10,5	4,94
Instalación de placas fotovoltaicas sin batería	3445,6	474,16	7,27	7,27
Implementación de tecnología V2H (Vehicle-to-Home)	7350	1066,97	6,4	7,84
Sustitución de la caldera por una de condensación	2477,45	3111,44	18,1	3,77
Instalación de colectores solares térmicos	975	180,78	6,1	6,76
TOTAL	16552	-	-	-

Tabla 42: Medidas seleccionadas para su implementación

La selección de estas medidas se basa en su rentabilidad económica demostrada, su viabilidad técnica y su capacidad para reducir el consumo energético sin comprometer el confort ni la funcionalidad de la vivienda. En el siguiente apartado se procederá a calcular la reducción esperada en los gastos energéticos anuales, considerando la aplicación conjunta de todas las medidas seleccionadas, con el objetivo de cuantificar el impacto global de la propuesta sobre la factura energética del hogar.

4.4 Cálculo de los ahorros asociados a las medidas seleccionadas

Una vez definidas las medidas que se van a implementar en la vivienda, es importante cuantificar de forma global cuál será su impacto sobre los gastos energéticos anuales. Hasta ahora, el análisis se ha centrado en evaluar cada medida de manera individual, pero en este apartado se estudiará el efecto conjunto de todas las actuaciones seleccionadas sobre la factura energética de la vivienda.

El objetivo es estimar de forma clara cuánto se reducirá el consumo tanto de electricidad como de gas natural, y cómo se traduce esto en ahorro económico directo para el propietario. Este cálculo permitirá conocer cuánto se pagará al año tras aplicar la propuesta, compararlo con la situación de partida y, en definitiva, valorar la rentabilidad del proyecto desde una perspectiva integral.

Además, servirá como base para comprobar si se cumplen los objetivos de mejora planteados al inicio del trabajo, y reforzará la justificación de las medidas elegidas en términos no solo técnicos y económicos, sino también prácticos y cotidianos para el usuario final.

Para calcular la reducción de los gastos energéticos anuales tras la implantación de las medidas seleccionadas, es necesario sumar los ahorros energéticos de cada tipo, diferenciando entre ahorro eléctrico (kWh de electricidad) y ahorro térmico (kWh de gas natural). Una vez obtenidos los totales, se restarán del consumo energético actual de la vivienda, permitiendo así recalcular las dos facturas por separado. A partir de los nuevos consumos y de los precios reales utilizados en el capítulo 2, se obtendrán los nuevos costes energéticos anuales, lo que permitirá cuantificar el ahorro económico total generado por el conjunto de medidas implantadas.

A continuación, se muestran las medidas de eficiencia energética que generan un ahorro directo en el consumo eléctrico de la vivienda:

Medida	Ahorro energético (kWh/año)
Sustitución de iluminación a LED	2275,4
Mejora en el uso de enchufes (domótica básica)	896,21
Instalación de placas fotovoltaicas sin batería	4444
TOTAL	7850,67

Tabla 43: Ahorro energético eléctrico anual estimado

Cabe señalar que la tecnología Vehicle-to-Home (V2H) no genera un ahorro energético en términos de kWh, por lo que no aparece en la tabla anterior. Sin embargo, permite optimizar el coste de la energía al comprar 11351,5 kWh/año en hora valle y utilizarlos en hora punta, lo que se traduce en un ahorro económico anual de 1157,51 € gracias al arbitraje horario. Este impacto se tendrá en cuenta en el cálculo final de reducción de costes energéticos.

Al aplicar las medidas de tipo eléctrico, se tiene que la reducción total es de 7850,67 kWh anuales, por lo que pasa a consumir:

$$25605,67 \text{ kWh} - 7850,67 \text{ kWh} = 17755 \text{ kWh}$$

Pero hay que tener en cuenta que gracias al sistema V2H, 11351,5 kWh se compran en horas valle, por lo que se tiene que la factura de luz de la vivienda reformada es:

1. Término de energía:

- a. $P1: 0,18767 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 3201,75 \text{ kWh} = 600,87 \text{ €}$
- b. $P2: 0,11610 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 3201,75 \text{ kWh} = 371,72 \text{ €}$
- c. $P3: 0,08921 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 11351,5 \text{ kWh} = 1012,55 \text{ €}$

i. Total término de energía: 1985,15 €

2. Término de potencia:

- a. $P1: 0,065376 \frac{\text{€}}{\text{kW} * \text{día}} * 9,9 \text{ kW} * 365 \text{ días} = 236,23 \text{ €}$
- b. $P2: 0,002647 \frac{\text{€}}{\text{kW} * \text{día}} * 9,9 \text{ kW} * 365 \text{ días} = 9,56 \text{ €}$

i. Total término de potencia: 245,79 €

- 3. Alquiler de contador: $0,0451613 \text{ €/día} * 365 \text{ días} = 16,48 \text{ €}$
- 4. Impuesto electricidad: $3,8\% \text{ sobre } 2230,94 \text{ €} = 84,77 \text{ €}$
- 5. Base imponible: $1985,15 + 245,79 + 16,48 + 84,77 = 2332,19 \text{ €}$
- 6. IVA: $0,1 * 2332,19 = 233,22 \text{ €}$
- 7. Total a pagar: $2332,19 + 233,22 = \mathbf{2565,41 \text{ €}}$

Teniendo en cuenta los distintos periodos y los precios que nos ofrece la tarifa contratada se tiene que, para poder satisfacer la demanda eléctrica de la vivienda, se han de pagar 2565,41 € anuales.

En la siguiente tabla se recogen las medidas que contribuyen a disminuir el consumo de energía térmica, asociadas a la calefacción y al agua caliente sanitaria:

Medida	Ahorro energético (kWh/año)
Zonificación mediante domótica	9145,44
Sustitución de caldera	15295
Instalación de colectores solares	3256,1
TOTAL	27696,54

Tabla 44: Ahorro energético eléctrico anual estimado

Al aplicar las medidas de tipo térmico, se tiene que la reducción total es de 27696,54 kWh anuales, por lo que pasa a consumir:

$$52180 \text{ kWh} - 27696,54 \text{ kWh} = 24483,46 \text{ kWh}$$

Teniendo en cuenta esta reducción de consumo, la factura de gas quedaría:

1. Término fijo: $0,48918 \text{ €/día} * 365 \text{ días} = 178,55 \text{ €}$
2. Consumo de gas: $24483,46 \text{ kWh} * 0,044324 \text{ €/kWh} = 1085,2 \text{ €}$

Nota: El precio del consumo del gas fluctúa mucho a lo largo de los meses, se ha realizado la media ponderada y se ha obtenido 0,044324 €/kWh.

3. Impuesto Especial sobre hidrocarburos: $0,002340 \text{ €/kWh} * 24483,46 \text{ kWh} = 57,29 \text{ €}$
4. Otros conceptos gas:
 - Alquiler del contador: $0,019016 \text{ €/día} * 365 \text{ días} = 6,94 \text{ €}$
5. Total gas: $178,55 + 1085,2 + 57,29 + 6,94 = 1327,98 \text{ €}$
6. IVA: $0,21 * 1327,98 \text{ €} = 278,87 \text{ €}$
7. Total a pagar: $1327,98 + 278,87 = 1606,85 \text{ €}$

Para poder satisfacer la demanda térmica de la vivienda, se han de pagar 1606,85 € anuales.

4.5 Financiación de las medidas

Una vez seleccionadas las medidas de eficiencia energética que presentan una viabilidad técnica y económica positiva, es necesario afrontar una cuestión igual de crítica, pero a menudo menos tratada en detalle, cómo financiar su ejecución real. Por muy favorable que sea un VAN o una TIR sobre el papel, si no se dispone del capital necesario para llevar a cabo las actuaciones o no se escoge una estrategia de financiación adecuada al contexto del propietario, el proyecto puede quedarse en nada.

En el ámbito residencial la toma de decisiones financieras tiene un componente mucho más personal, ya que está condicionada por el nivel de ahorro familiar, la tolerancia al

endeudamiento, la percepción de riesgo, y a menudo por elementos intangibles como la confianza en la tecnología o el miedo a “no recuperar nunca lo invertido”. En este sentido, cualquier estrategia de financiación que se proponga debe ser tan realista como flexible, capaz de adaptarse a las circunstancias de cada caso.

Este apartado tiene como objetivo analizar las diferentes alternativas disponibles para cubrir la inversión inicial del proyecto, atendiendo no solo a su viabilidad teórica, sino también a criterios prácticos como el impacto sobre la liquidez, el retorno financiero percibido a corto plazo y la posibilidad de escalar el proyecto por fases si fuera necesario. Se pretende así construir una visión completa y coherente con el resto del análisis técnico-económico.

Uno de los principales obstáculos para la implantación de mejoras energéticas en viviendas es el carácter inmediato del desembolso frente al carácter progresivo del retorno. Es decir, la inversión debe afrontarse hoy, mientras que el ahorro se produce poco a poco durante los próximos años. Esta asimetría temporal, combinada con la incertidumbre sobre el precio de la energía futura o la posible evolución de las tecnologías, hace que muchos propietarios pospongan constantemente la implantación de las medidas.

De forma general, se pueden distinguir tres esquemas principales de financiación:

1. Autofinanciación total o equity:

Esta opción se basa en el uso exclusivo de fondos propios del propietario de la vivienda. Presenta como principales ventajas la ausencia de intereses, comisiones o dependencia de terceros. Además, permite una ejecución inmediata y una gestión directa del proyecto sin restricciones externas.

Sin embargo, la autofinanciación también tiene limitaciones importantes. Por un lado, requiere una liquidez elevada que no siempre está disponible. Por otro, obliga a asumir en solitario todo el riesgo financiero, y no permite diversificar ni aplazar el impacto del gasto.

2. Financiación externa (deuda o inversión):

Este modelo permite ejecutar el proyecto sin necesidad de disponer del capital total desde el inicio, mediante el uso de préstamos, líneas de crédito específicas o fórmulas de inversión externa. Su ventaja principal es que reduce la barrera de entrada económica, permitiendo

aprovechar los beneficios del ahorro energético desde el primer momento. Además, puede mejorar el rendimiento del capital propio si se estructura adecuadamente.

Las principales vías externas son:

- Préstamos personales: son ofrecidos por entidades bancarias o financieras, normalmente con intereses fijos y plazos de amortización de entre 5 y 15 años. Algunos bancos ya ofrecen productos específicos para reformas energéticas con condiciones mejoradas.
- Fondos de inversión: pueden participar en proyectos residenciales si el volumen de inversión o el contexto lo justifica (por ejemplo, bloques de viviendas o comunidades de propietarios).
- Financiación colectiva (crowdfunding): se hace a través de plataformas digitales, con modelos basados en participación, recompensas o royalties. Aunque menos habitual en el entorno doméstico, puede ser una opción interesante para proyectos innovadores o con impacto social, especialmente si se vinculan a comunidades energéticas locales o a modelos cooperativos.

En todos los casos, es fundamental calcular el impacto real del coste financiero sobre la rentabilidad del proyecto, y asegurarse de que la cuota mensual sea inferior al ahorro energético mensual, para que el flujo de caja neto sea positivo desde el inicio. Este análisis se desarrollará en los apartados siguientes.

3. Financiación mixta o combinada:

En la práctica, la mayoría de los proyectos combinan diferentes fuentes de financiación. Este modelo mixto permite equilibrar riesgo, control y flexibilidad. Por ejemplo, el propietario puede cubrir parte de la inversión con ahorros propios, complementar con un préstamo parcial, y aprovechar además subvenciones públicas o deducciones fiscales.

Una ventaja adicional de este enfoque es que permite escalar el proyecto por etapas, ejecutando primero las medidas con mayor rentabilidad y menor coste, y dejando para fases posteriores aquellas que requieren más inversión. Este modelo escalonado, mejora la accesibilidad económica y reduce la carga financiera acumulada.

Uno de los aspectos más decisivos a la hora de ejecutar proyectos de eficiencia energética en el sector residencial es el acceso a ayudas públicas. Estas medidas de apoyo económico actúan como un elemento compensador frente al esfuerzo inversor inicial, reduciendo sustancialmente el plazo de recuperación de la inversión y mejorando la rentabilidad global del proyecto.

En muchos casos, la existencia o no de una subvención puede ser el factor diferencial que convierte un proyecto marginal en uno netamente rentable. Es por ello que, más allá de los modelos clásicos de financiación, es necesario considerar de forma estratégica todos los instrumentos de apoyo institucional disponibles, tanto a nivel nacional como autonómico y europeo.

Las ayudas públicas a la eficiencia energética pueden adoptar diferentes formas, cada una con su propia lógica y requisitos. Las más comunes son:

- Subvenciones a fondo perdido: Son aportaciones directas de capital que no deben devolverse. Pueden cubrir desde un 20 % hasta más del 60 % del coste subvencionable, dependiendo del tipo de actuación, del nivel de mejora energética conseguido y del perfil del solicitante (vivienda habitual, colectivo vulnerable, etc.).
- Préstamos reembolsables en condiciones ventajosas: Financiación ofrecida a tipos de interés muy por debajo del mercado, o incluso al 0 %, con plazos amplios de devolución. Suelen estar asociados a programas europeos de desarrollo sostenible.

A nivel nacional, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) coordina y publica muchas de las convocatorias generales, aunque la gestión concreta suele recaer en las comunidades autónomas, que son quienes convocan, valoran y otorgan las ayudas de forma descentralizada.

Entre los programas más destacados se encuentran:

- PREE y PREE 5000 (Programa de Rehabilitación Energética de Edificios) [44]: centrados en rehabilitación integral o parcial de edificios residenciales. Las ayudas

dependen del ahorro energético conseguido (mínimo un 30 %) y son mayores en municipios de reto demográfico.

- Programas Next Generation EU [45]: financiados con fondos europeos de recuperación, ofrecen subvenciones extraordinarias para actuaciones de eficiencia energética en viviendas y edificios. Estos programas han supuesto un salto cualitativo en la capacidad financiera disponible para reformas, pero también han introducido una carga administrativa importante y unos plazos de ejecución y justificación ajustados.
- Ayudas específicas por comunidad autónoma [46]: muchas regiones lanzan sus propias convocatorias adaptadas a su parque edificatorio, clima y planificación energética. En el caso de Madrid, por ejemplo, existen líneas específicas para cambios de caldera, instalación de autoconsumo o mejora de aislamiento térmico.

Desde el punto de vista financiero, contar con una subvención puede suponer una reducción inmediata del capital a invertir, lo cual repercute directamente tanto en los indicadores económicos del equity (inversor):

- El VAN del equity aumenta, ya que la inversión neta a cargo del propietario es menor, mientras que los ahorros energéticos permanecen constantes.
- El Payback del capital aportado se reduce considerablemente, acortando el periodo de recuperación de la inversión.
- La TIR del equity se incrementa, ya que mejora la rentabilidad relativa de la inversión privada frente a otras alternativas de uso del capital.

Es importante señalar que la subvención no modifica los indicadores del proyecto en sí mismo (VAN o TIR del proyecto), ya que estos reflejan la rentabilidad técnica-económica global, sin contar con el factor de quién es el que financia la inversión.

Además, en combinación con financiación externa, las subvenciones permiten que las cuotas de amortización sean más bajas que el ahorro energético mensual generado, consiguiendo así un flujo de caja neto positivo desde el primer mes.

4.5.1 Alternativas financieras disponibles

En este punto del proyecto, y una vez analizadas las distintas alternativas de financiación existentes en el mercado, resulta necesario hacer una reflexión realista y adaptada a la naturaleza del caso concreto que se está estudiando: una vivienda unifamiliar, de un único propietario y uso residencial. Este matiz es fundamental, ya que condiciona de forma directa las vías de financiación que realmente tienen sentido. Si bien es cierto que existen numerosos mecanismos financieros diseñados para promover la eficiencia energética, no todos ellos son aplicables en cualquier contexto. Por ejemplo, los fondos de inversión suelen buscar proyectos de mayor envergadura, que supongan una oportunidad de rentabilidad a medio o largo plazo con cierta seguridad jurídica y escalabilidad. Es habitual ver su participación en edificios de viviendas con un único propietario (como puede ser un promotor o una gestora de alquiler), o en rehabilitaciones integrales de bloques gestionadas por comunidades de vecinos, donde el importe total y el impacto energético y social justifican su interés. De forma similar, el crowdfunding puede ser una opción válida en casos donde el proyecto tenga una carga simbólica o comunitaria, por ejemplo, una comunidad energética local, la rehabilitación de un edificio histórico con valor social, o la instalación compartida de autoconsumo fotovoltaico entre varios hogares. Sin embargo, en nuestro caso, como es una vivienda privada y particular, es poco probable que este tipo de iniciativas resulten atractivas para inversores externos ni tenga conseguir financiación colectiva, por lo que se descartan.

Dicho esto, la cantidad de posibilidades sigue siendo amplia. De forma general, se contemplan tres escenarios principales: la financiación propia total, en la que el propietario afronta el coste íntegro de las medidas con recursos personales; la financiación externa total, normalmente mediante un préstamo bancario; y la financiación mixta, que combina parte del capital propio con financiación externa. Todas estas alternativas tienen sentido y pueden ser adecuadas dependiendo del perfil financiero del propietario y de su estrategia. En casos donde se dispone de liquidez suficiente o donde se prefiere evitar la deuda, la autofinanciación es una opción válida que elimina los costes financieros y simplifica la gestión. Por el contrario, si se prioriza mantener el ahorro disponible o no se dispone del capital necesario, lo más habitual en la práctica, y especialmente en el entorno residencial, es recurrir a un préstamo personal, como hacen la mayoría de familias al acometer reformas de cierta envergadura. Esta opción permite ejecutar la inversión sin descapitalizarse y

beneficiarse del ahorro energético desde el primer momento, amortizando el préstamo poco a poco con los ahorros generados en la factura energética.

Ahora bien, en muchos casos, la opción más equilibrada es un modelo de financiación mixta, que permite asumir una parte de la inversión con fondos propios (reduciendo así la deuda y el coste financiero total) y financiar el resto con apoyo bancario u otros mecanismos, aprovechando además las subvenciones disponibles. Este enfoque mixto tiene la ventaja de que adapta la inversión a la capacidad económica del propietario, sin posponer la actuación ni comprometer su estabilidad financiera. Además, al combinar financiación y subvención, se pueden diseñar esquemas en los que las cuotas mensuales del préstamo sean inferiores al ahorro energético obtenido, logrando así un flujo de caja positivo desde el inicio.

Por tanto, a lo largo de este capítulo se analizarán las tres modalidades de financiación (propia, externa y mixta) aplicadas a este proyecto concreto, valorando su impacto económico en términos de Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Payback, tanto del equity como del proyecto. En todos los escenarios se tendrá en cuenta la posibilidad de acogerse a subvenciones públicas, que suponen un factor decisivo para mejorar la viabilidad económica del proyecto. El objetivo final no es solo identificar la alternativa más rentable desde el punto de vista técnico-financiero, sino también aquella que resulte más lógica, sostenible y realista en función del contexto y del perfil del propietario.

Una vez seleccionadas y cuantificadas las medidas de eficiencia energética más viables, tanto desde el punto de vista técnico como económico, se procede a simular distintos escenarios de financiación con el fin de evaluar su impacto real sobre la rentabilidad del proyecto. El conjunto de actuaciones elegidas permite alcanzar un ahorro energético anual estimado de 2962,8€, gracias a la reducción del consumo eléctrico y térmico de la vivienda. Este ahorro recurrente contrasta con una inversión inicial total de 16552 €, que debe ser afrontada en el momento cero del proyecto. A partir de estos valores base, se analizan distintas estrategias de financiación (con y sin subvención) para determinar cómo influyen en los indicadores económicos principales del proyecto (VAN, TIR y flujo de caja neto). A continuación, se detallan los cinco escenarios considerados.

Para los escenarios en los que se contempla financiación externa, se ha supuesto que el préstamo bancario se concede con una tasa de interés fija del 5 % anual. Este valor representa

una estimación coherente con las condiciones habituales ofrecidas por entidades financieras para reformas energéticas en viviendas particulares. La amortización se plantea en cuotas constantes, con un plazo de devolución igual que el horizonte temporal del proyecto (10 años), permitiendo así comparar el impacto económico y el flujo de caja asociado en cada caso.

Para que el análisis sea lo más realista y preciso posible, en cada uno de los escenarios se va a calcular su propio coste medio ponderado del capital (WACC), teniendo en cuenta cuánto se aporta con dinero propio (equity) y cuánto se financia mediante préstamo (deuda). Esto es importante porque el WACC representa, en el fondo, el coste real del dinero que se necesita para sacar adelante el proyecto. Este valor se utilizará como tasa de descuento para calcular el VAN de cada caso, y también como referencia para ver si la TIR del proyecto supera o no ese coste del capital. Si lo hace, significa que la inversión merece la pena desde el punto de vista financiero. La fórmula del WACC es la siguiente:

$$WACC = \frac{E}{E + D} * Ke + \frac{D}{D + E} * Kd * (1 - T)$$

Siendo cada variable:

- ✓ E son los fondos propios.
- ✓ D es la deuda financiera.
- ✓ Ke es el coste del capital propio.
- ✓ Kd es el coste de la deuda (impuesta por banco).
- ✓ T es la tasa impositiva, suele ser de un 30%.

Al aplicar la fórmula del WACC para cada uno de los escenarios se obtiene:

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
WACC	4,00%	4,00%	3,75%	3,75%	3,60%

Tabla 45: Resultados del WCC en función de los escenarios

A continuación, se presentan los cinco escenarios planteados, con su correspondiente estructura financiera y su impacto en los principales indicadores económicos tanto del proyecto como del equity.

Los cinco escenarios analizados son:

- **Escenario 1: Financiación 100 % con capital propio (sin subvención)**

ESCENARIO 1	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
INVERSIÓN INICIAL	-16.552										
SUBVENCIÓN	0										
PRÉSTAMO	0										
Devolución préstamo											
Interés											
Ahorro energético		2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963
FLUJO NETO DE CAJA	-16.552	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963

TIRe	12,28%	TIR	12,28%
VANe	7.480,58 €	VAN	7.480,58 €

En este primer escenario, el propietario asume la totalidad de la inversión con fondos personales, sin recurrir a financiación externa ni acogerse a ninguna subvención pública. Representa la opción más simple desde el punto de vista financiero y la que maximiza el control y la independencia en la ejecución.

La inversión inicial asciende a 16552 €, y el ahorro energético anual previsto es de 2963 €, lo que genera un flujo neto positivo y constante durante los diez años de análisis. Al no haber financiación, los flujos de caja del proyecto coinciden exactamente con los del equity, por lo que el análisis económico es idéntico para ambos enfoques.

Los resultados presentan una rentabilidad razonable, el VAN del proyecto es de 7480,58 € y la TIR alcanza el 12,28 %.

Este escenario es ideal para propietarios con suficiente liquidez que desean evitar deuda y costes financieros. Sin embargo, supone un esfuerzo económico importante al tener que afrontar toda la inversión desde el principio, algo que puede echar para atrás si el propietario prefiere reservar ese dinero para otras necesidades.

- **Escenario 2: Financiación 100 % con capital propio (con subvención del 30 %)**

Este segundo escenario plantea la misma lógica que el anterior, pero incorporando una subvención del 30 % del coste total del proyecto. En este caso, el capital propio cubre únicamente el 70 % restante, lo que reduce significativamente el desembolso inicial (equity).

ESCENARIO 2	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
INVERSIÓN INICIAL	-16.552										
SUBVENCIÓN	4.966										
PRÉSTAMO	0										
Devolución préstamo											
Interés											
Ahorro energético		2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963
FLUJO NETO DE CAJA	-11.586	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963

TIRe	22,10%	TIR	12,28%
VANe	12.446,18 €	VAN	7.480,58 €

Los ahorros energéticos anuales se mantienen constantes en 2963 €, generando un flujo positivo desde el primer año. Como no hay financiación externa, no existen costes financieros ni compromisos con entidades bancarias, lo que facilita la gestión del proyecto y elimina riesgos asociados a la deuda.

A nivel económico, el impacto de la subvención es muy positivo, ya que, aunque la TIR del proyecto sigue siendo del 12,28 % (idéntica al escenario anterior, ya que los flujos y la inversión total no cambian), la TIR del equity se eleva hasta el 22,10 %, y el VAN del propietario asciende a 12446,18 €. En otras palabras, con menos dinero invertido, el propietario obtiene una rentabilidad mucho mayor.

Este escenario es especialmente interesante para quienes disponen de fondos propios, pero buscan minimizar el esfuerzo inicial gracias a las ayudas públicas disponibles. Es una opción a tener en cuenta, ya que mejora notablemente la rentabilidad sin necesidad de recurrir a financiación externa.

- **Escenario 3: 50 % capital propio y 50 % financiación externa (sin subvención)**

Este caso representa una situación intermedia, donde el propietario financia la mitad del proyecto con sus propios fondos y solicita un préstamo personal para cubrir el 50 % restante. Es una opción común cuando se dispone de parte del capital necesario, pero se prefiere no descapitalizarse completamente.

ESCENARIO 3	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
INVERSIÓN INICIAL	-16.552										
SUBVENCIÓN	0										
PRÉSTAMO	8.276										
Devolución préstamo		-827,6	-827,6	-827,6	-827,6	-827,6	-827,6	-827,6	-827,6	-827,6	-827,6
Interés		-413,8	-372,42	-331,04	-289,66	-248,28	-206,9	-165,52	-124,14	-82,76	-41,38
Ahorro energético		2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963
FLUJO NETO DE CAJA	-8.276	1.722	1.763	1.804	1.846	1.887	1.929	1.970	2.011	2.053	2.094

TIRe	18,18%	TIR	12,28%
VANe	7.289,46 €	VAN	7.782,49 €

La inversión personal (equity) baja hasta los 8276 €, y los flujos netos anuales se ajustan teniendo en cuenta la devolución del préstamo y los intereses. A pesar de ello, el ahorro energético de 2963 € anuales permite mantener un flujo de caja positivo desde el primer año, lo cual es clave para la sostenibilidad económica del proyecto.

En cuanto a los resultados, el proyecto sigue siendo rentable: la TIR del proyecto se mantiene en 12,28 %, ya que los flujos globales y la inversión total no han cambiado. Sin embargo, la TIR del equity sube a un 18,18 %, y el VAN del propietario es de 7289,46 €, lo que refleja una rentabilidad muy interesante sobre el capital aportado.

Este escenario representa una opción equilibrada, el propietario no necesita disponer de todo el dinero al principio y puede hacer el proyecto sin comprometer su liquidez. Es cierto que acepta pagar algo de interés bancario, pero esto no compromete la viabilidad ni la rentabilidad global de la inversión.

- **Escenario 4: 50 % capital propio y 50 % financiación externa (con subvención del 30 %)**

Este escenario combina capital propio y financiación externa a partes iguales, pero aplica una subvención del 30 %. En este caso, ambos porcentajes (50 % préstamo, 50 % fondos propios) se calculan sobre el 70 % restante del coste total, una vez aplicada la ayuda pública.

ESCENARIO 4	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
INVERSIÓN INICIAL	-16.552										
SUBVENCIÓN	4.966										
PRÉSTAMO	5.793										
Devolución préstamo		-579,32	-579,32	-579,32	-579,32	-579,32	-579,32	-579,32	-579,32	-579,32	-579,32
Interés		-289,66	-260,694	-231,728	-202,762	-173,796	-144,83	-115,864	-86,898	-57,932	-28,966
Ahorro energético		2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963
FLUJO NETO DE CAJA	-5.793	2.094	2.123	2.152	2.181	2.210	2.239	2.268	2.297	2.326	2.355

TIRe	35,52%	TIR	12,28%
VANe	12.402,97 €	VAN	7.782,49 €

Los flujos netos anuales siguen siendo positivos, ya que el ahorro energético de 2963 € al año cubre sin problemas las cuotas del préstamo y los costes financieros asociados.

En cuanto a los resultados económicos, el VAN del proyecto se mantiene en 7782,49 €, y la TIR del proyecto continúa siendo del 12,28 %, igual que en los escenarios anteriores. Sin embargo, el impacto sobre el propietario es mucho más favorable, ya que el VAN del equity sube hasta los 12402,97 €, y la TIR del equity alcanza un 35,52 %, lo que implica una rentabilidad muy elevada sobre una inversión personal reducida.

Este escenario representa una opción muy interesante para propietarios con poco capital disponible, dado que, gracias a la subvención y a la financiación parcial, se consigue poner en marcha el proyecto con un desembolso bajo y una rentabilidad excelente. Es, probablemente, una de las combinaciones más eficientes entre esfuerzo económico, riesgo asumido y el retorno que se obtiene.

- **Escenario 5: 80 % financiación externa y 20 % capital propio (con subvención del 30 %)**

Este último escenario representa una situación en la que el propietario dispone de poco capital y opta por financiar el 80 % del coste restante (tras subvención) mediante un préstamo. El 20 % restante es cubierto con fondos propios. Se trata de un esquema muy habitual cuando el objetivo es ejecutar el proyecto sin que la falta de liquidez sea un impedimento.

ESCENARIO 5	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
INVERSIÓN INICIAL	-16.552										
SUBVENCIÓN	4.966										
PRÉSTAMO	9.269										
Devolución préstamo		-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912
Interés		-463,456	-417,1104	-370,7648	-324,4192	-278,0736	-231,728	-185,3824	-139,0368	-92,6912	-46,3456
Ahorro energético		2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963
FLUJO NETO DE CAJA	-2.317	1.573	1.619	1.665	1.712	1.758	1.804	1.851	1.897	1.943	1.990

TIRe	70,27%	TIR	12,28%
VANe	12.310,10 €	VAN	7.966,36 €

El ahorro energético sigue siendo el mismo (2963 € anuales), pero los flujos netos se ven reducidos por el peso de las cuotas del préstamo, especialmente en los primeros años. Aun así, se mantienen positivos y crecientes, lo que permite un retorno constante y manejable incluso con un nivel de endeudamiento elevado.

Desde el punto de vista técnico, los resultados del proyecto no cambian mucho, el VAN del proyecto es de 7966,36 € y la TIR del proyecto se mantiene en 12,28 %, al igual que en los escenarios anteriores. Sin embargo, el impacto sobre la rentabilidad del propietario es muy considerable, ya que el VAN del equity se sitúa en 12310,10 €, y la TIR del equity se dispara hasta el 70,27 %, lo que indica un aprovechamiento máximo del capital propio gracias al apalancamiento y la subvención.

Este escenario es especialmente atractivo para propietarios con muy poca liquidez, dispuestos a asumir algo más de complejidad financiera a cambio de multiplicar su rentabilidad.

Para tener una visión clara y comparativa de las distintas opciones de financiación planteadas, se ha elaborado la siguiente tabla resumen. En ella se recogen los datos más relevantes de cada escenario: cuánto aporta el propietario, si se recibe alguna subvención, cuánto se financia con préstamo y cuáles son los resultados económicos clave del proyecto, tanto en términos generales como desde el punto de vista del propietario.

Escenario	Aportación propia (€)	Subvención (€)	Préstamo (€)	VAN proyecto (€)	TIR proyecto (%)	VAN equity (€)	TIR equity (%)
Escenario 1	16552	0	0	7480,58	12,28	7480,58	12,28
Escenario 2	11586	4966	0	7480,58	12,28	12446,18	22,10
Escenario 3	8276	0	8276	7782,49	12,28	7289,46	18,18
Escenario 4	5793	4966	5793	7782,49	12,28	12402,97	35,52
Escenario 5	2317	4966	9269	7966,36	12,28	12310,10	70,27

Tabla 45: Comparativa de los escenarios planteados

Tal y como se puede ver en la Tabla 45, la TIR del proyecto se mantiene constante en todos los escenarios (12,28 %). Esto tiene sentido, ya que la rentabilidad técnica del proyecto no depende de cómo se financie, sino de los ahorros energéticos generados y la inversión total realizada, que son los mismos en todos los posibles escenarios.

Por otro lado, el VAN del proyecto varía ligeramente entre escenarios debido al uso de distintos WACC (coste medio del capital). Cuando parte de la inversión se cubre con un préstamo o con una subvención, el coste total del dinero necesario para hacer el proyecto es más bajo. Como consecuencia, al calcular el valor actual de los ahorros futuros, estos valen más. Es decir, cuanto menor es el WACC, mayor es el VAN que se obtiene.

Donde realmente se observan diferencias es en la rentabilidad para el propietario. En escenarios con menor aportación personal y más apoyo externo (subvención o préstamo), el capital propio invertido es menor, pero los beneficios futuros siguen siendo los mismos. Esto hace que la TIR del equity crezca mucho más, y destaque especialmente el Escenario 5, donde con solo 2317 € de inversión personal se alcanza una TIR del 70,27 %. Por eso, este último escenario se considera el más interesante, ya que permite llevar a cabo el proyecto con muy poco esfuerzo económico inicial y ofrece la mayor rentabilidad para el propietario.

La Figura 37 resume de forma visual cómo varían el VAN y la TIR del capital propio en los cinco escenarios analizados. Permite ver qué opciones resultan más rentables para el propietario, ayudando a comparar fácilmente los efectos de combinar distintos niveles de aportación, financiación y subvención.

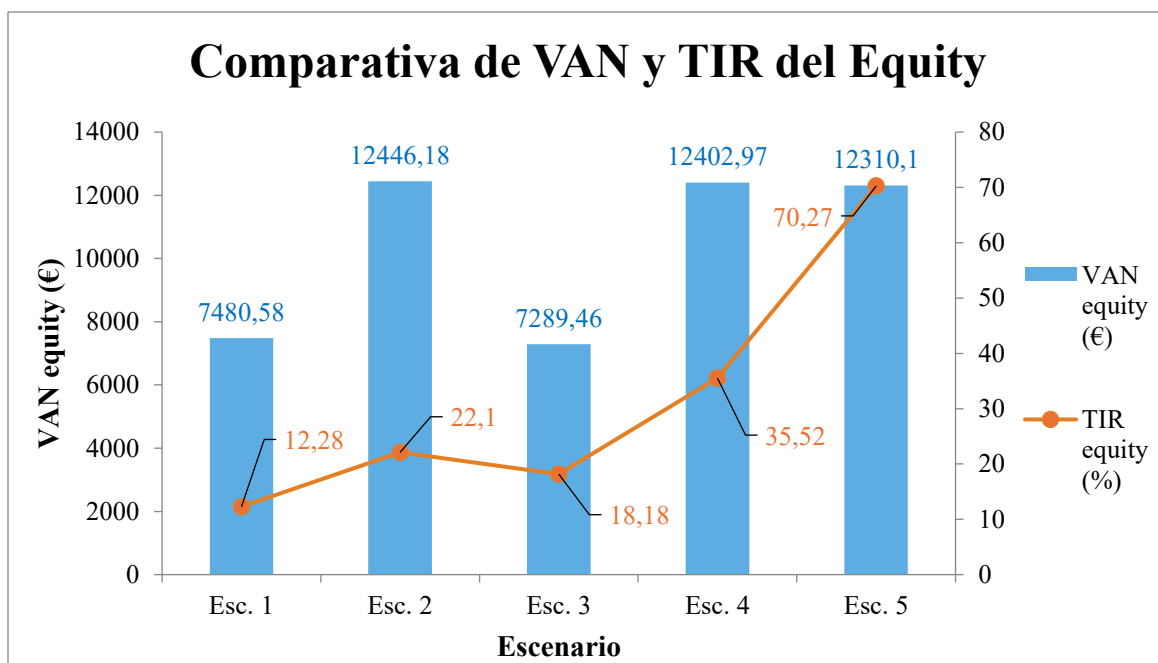


Figura 37: Comparativa de indicadores económicos del equity según el escenario

5. Resumen y conclusiones

La mejora de la eficiencia energética en el sector residencial es una de las palancas clave para avanzar hacia los objetivos de sostenibilidad marcados tanto por la Unión Europea como por la legislación nacional. A pesar de ello, sigue existiendo una barrera significativa para su implementación, especialmente en el ámbito doméstico in embargo, ya que existe cierta negación por parte de los propietarios a la hora de llevar a cabo este tipo de actuaciones, debido principalmente al desconocimiento sobre qué medidas aplicar, qué ahorro real puede conseguirse y cómo financiar la inversión. Este proyecto trata de resolver todas esas dudas, ofreciendo un análisis técnico, económico y financiero completo aplicado a un caso real.

El punto de partida del estudio ha sido la caracterización energética de una vivienda con un consumo energético total de 77785,6 kWh/año, repartido entre 24681,6 kWh eléctricos y 52180,00 kWh térmicos.

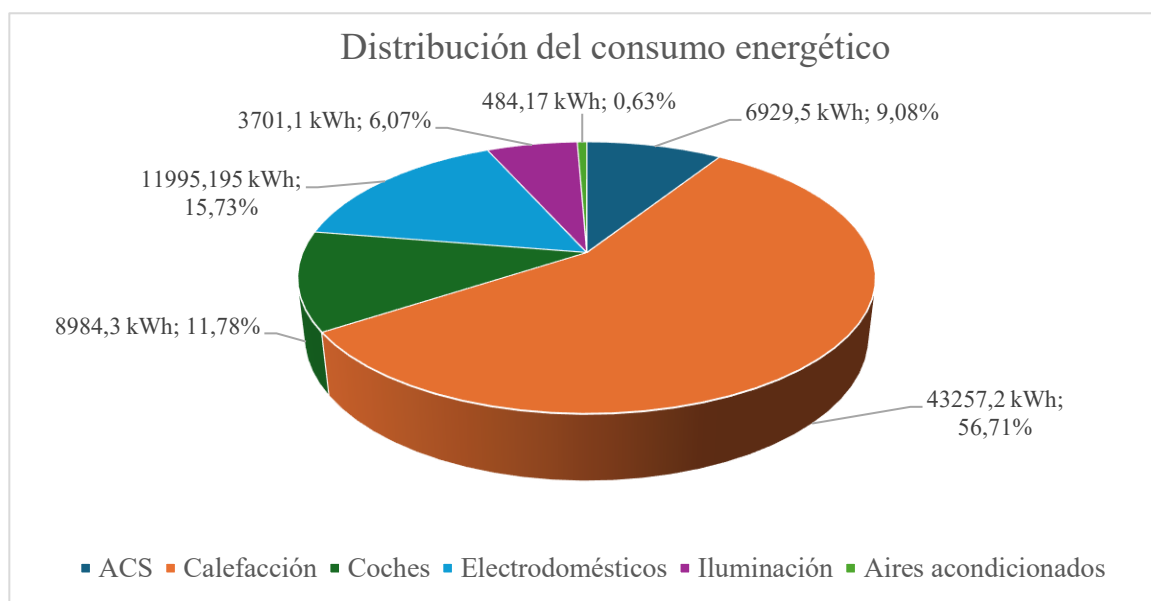


Figura 10: Distribución del consumo energético de la vivienda

Este nivel de consumo generaba una factura energética anual de 6938,57 €, compuesta por 3767,90 € en electricidad y 3170,67 € en gas natural. Estos valores reflejan una situación de partida ineficiente desde el punto de vista energético y costoso desde el punto de vista económico.

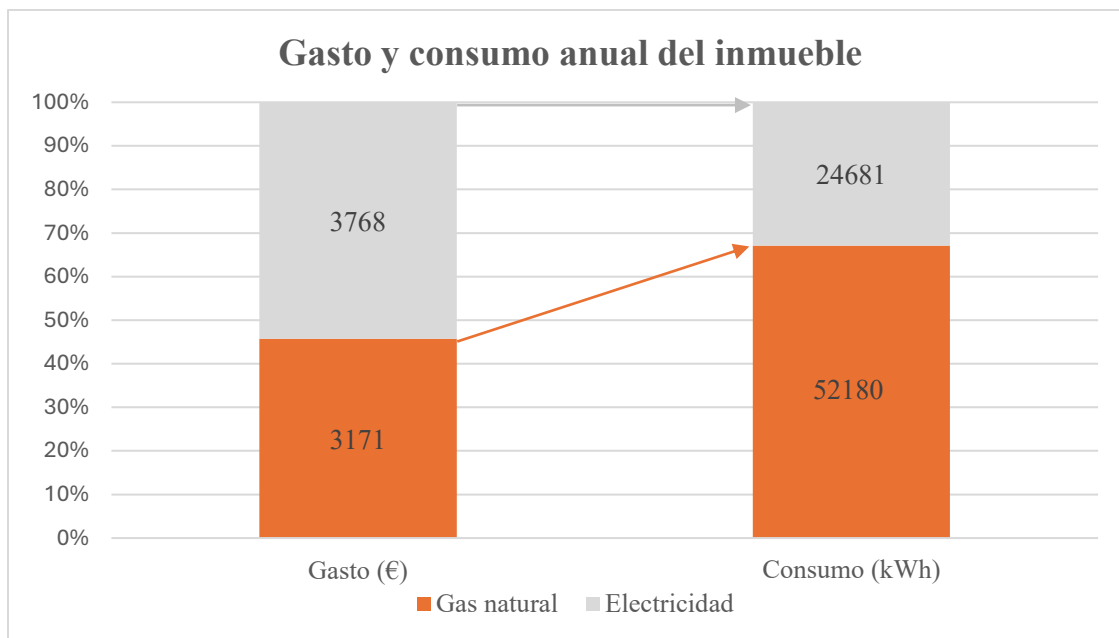


Tabla 15: Coste económico por suministro energético total anual

Antes de seleccionar únicamente las medidas viables, se simuló el impacto de aplicar la totalidad de las propuestas sobre la vivienda, con el objetivo de cuantificar el ahorro energético y económico máximo que se podría alcanzar. Este escenario teórico servía como punto de referencia para valorar el potencial del proyecto en su versión más ambiciosa, sin tener aún en cuenta la rentabilidad de cada actuación por separado.

A continuación, se presenta una comparativa entre los consumos energéticos anuales antes y después de aplicar todas las medidas, así como el coste asociado a las facturas de electricidad y gas en ambos casos. Esta primera simulación refleja el resultado máximo en términos de reducción de demanda y gasto energético, sirviendo como base para entender el impacto técnico del proyecto sin restricciones económicas.

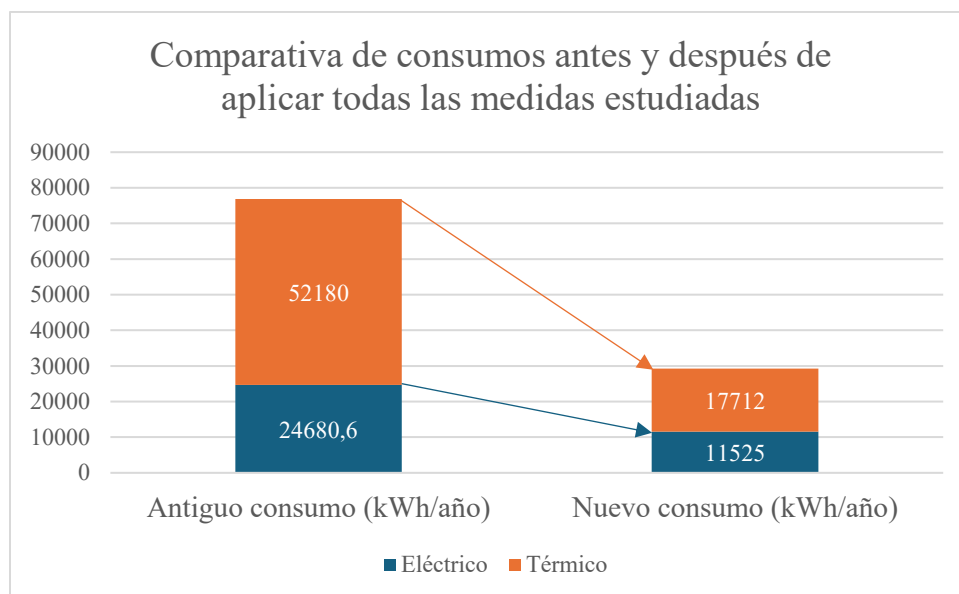


Figura 36: Consumos de la vivienda con y sin MAEs

La Figura 36 muestra de forma clara el impacto energético de aplicar la totalidad de las medidas de eficiencia energética consideradas en el proyecto. El consumo eléctrico anual se reduce de 24680,6 kWh a 11525,1 kWh, lo que supone una disminución del 52,3 %, mientras que el consumo térmico desciende de 52180,00 kWh a 17712,59 kWh, equivalente a una reducción del 66,05 %. En conjunto, el consumo total baja en más de 47800 kWh anuales, lo que demuestra el gran potencial de ahorro energético que puede alcanzarse cuando se aplican todas las medidas sin restricciones económicas. Esta gráfica establece el punto de referencia sobre el que posteriormente se contrastará el resultado del escenario con medidas seleccionadas.

Una vez analizado el escenario teórico en el que se aplicaban todas las medidas de eficiencia energética propuestas, se procedió a evaluar su viabilidad desde el punto de vista económico. Aunque técnicamente todas las medidas contribuían a reducir el consumo energético de la vivienda, no todas resultaban rentables cuando se analizaban individualmente.

Por este motivo, en el apartado 4 del trabajo se llevó a cabo un análisis económico detallado de cada medida, valorando el coste de inversión, el ahorro económico estimado y los principales indicadores financieros: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Payback. A partir de este análisis, se descartaron aquellas actuaciones que, a pesar

de su potencial técnico, no alcanzaban una rentabilidad suficiente dentro del horizonte temporal considerado.

Medida	Inversión inicial (€)	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)	Viabilidad económica
Cambio de bombillas por tecnología LED	128	2869,54	288,7	0,35	SÍ
Sustitución de electrodomésticos	2050	-741,31	-4,13	12,7	NO
Sistemas de control y automatización (stand-by)	95,94	974,07	130,8	0,73	SÍ
Sustitución de ventanas	11025	-10170	-13,6	105,56	NO
Zonificación térmica mediante domótica (gas)	2000	1279,18	10,5	4,94	SÍ
Mejora del aislamiento térmico de la vivienda	18593,54	-17302,6	-13,1	94,96	NO
Instalación de placas fotovoltaicas sin batería	3445,6	474,16	7,27	7,27	SÍ
Implementación de tecnología V2H (Vehicle-to-Home)	7350	1066,97	6,4	7,84	SÍ
Sustitución de la caldera por una de condensación	2557,45	3111,44	18,1	3,77	SÍ
Instalación de colectores solares térmicos	975	180,78	6,1	6,76	SÍ

Tabla 46: Indicadores económicos de las medidas de mejora energética propuestas

El resultado de este proceso fue un conjunto de medidas seleccionadas que sí resultan viables económicamente y que, por tanto, se plantean como la solución definitiva del proyecto. En la siguiente gráfica se presenta una nueva comparativa del consumo energético de la vivienda, considerando únicamente estas medidas viables. Este segundo escenario refleja una situación más ajustada a la realidad, que combina ahorro energético significativo con inversión justificada y retorno garantizado.

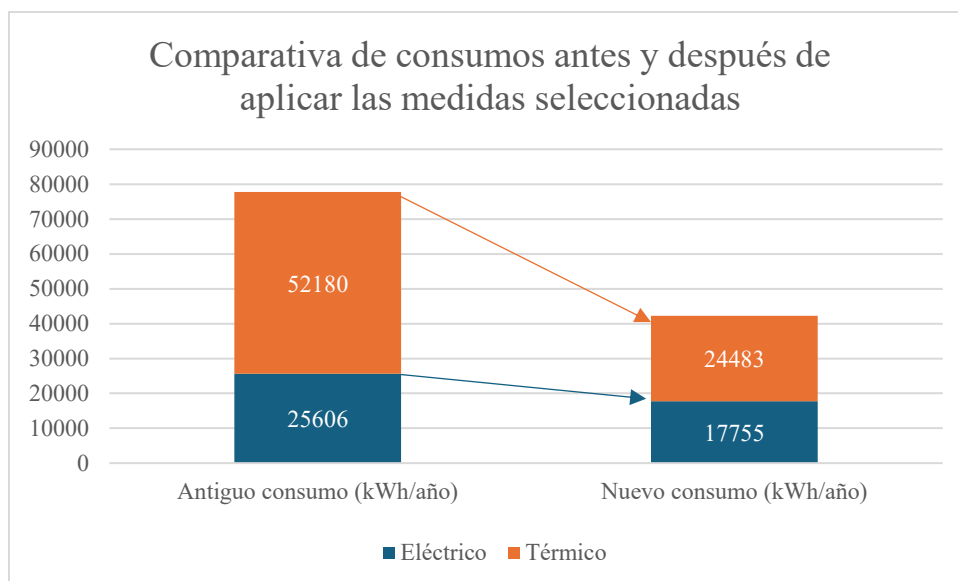


Figura 38: Consumos de la vivienda con las MAEs seleccionadas y sin ellas.

La Figura 38 muestra la evolución del consumo energético de la vivienda tras aplicar únicamente las medidas seleccionadas como viables desde el punto de vista económico. Como se puede observar, el consumo eléctrico se reduce de 25605,87 kWh/año a 17755,00 kWh/año, mientras que el consumo térmico baja de 52180,00 kWh/año a 24483,46 kWh/año. En conjunto, la vivienda logra una reducción del consumo total del 45,4 %, lo que demuestra que, incluso aplicando solo las medidas rentables, es posible alcanzar una mejora energética muy significativa.

Además del ahorro en consumo, estas reducciones tienen un impacto directo y positivo en el gasto energético anual de la vivienda. A continuación, se presenta una comparativa entre el coste de las facturas de electricidad y gas antes y después de la aplicación de las medidas seleccionadas. Esta comparación permite visualizar de forma clara la magnitud del ahorro económico logrado y refuerza la viabilidad global del proyecto.

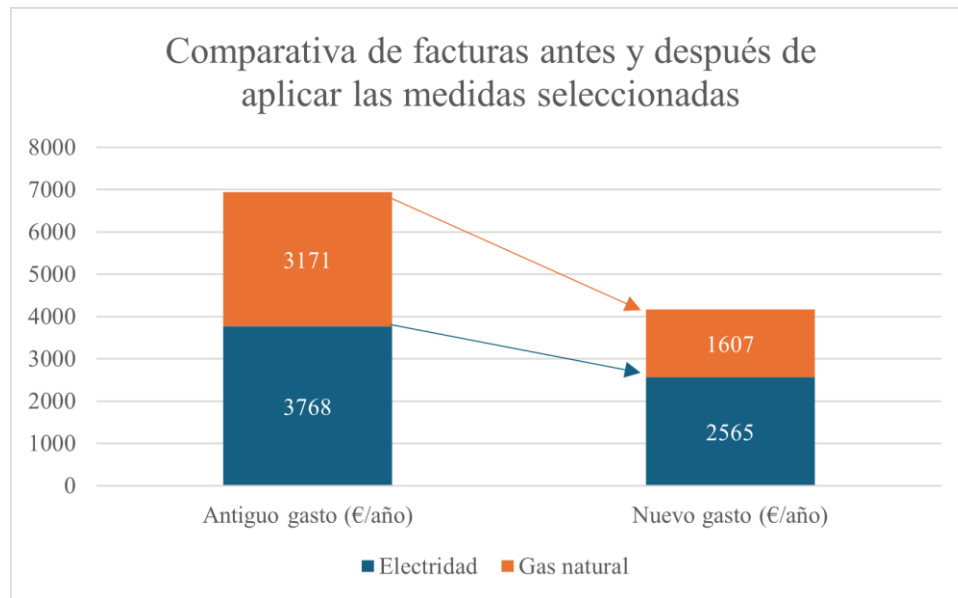


Figura 39: Gasto por cubrir la demanda de la vivienda antes vs después de las medidas seleccionadas

La figura 39 refleja la evolución del gasto energético anual de la vivienda antes y después de aplicar las medidas de eficiencia seleccionadas como viables. El coste total se reduce significativamente, pasando de 6938,57 € a 4172,40 € anuales, lo que supone un ahorro económico de 2766,17 € al año, equivalente a una reducción del 39,9 % en el gasto total.

En términos económicos, el ahorro generado se distribuye de la siguiente forma:

- Electricidad: el coste pasa de 3767,90 € a 2565,50 €, lo que supone un ahorro de 1202,40 € al año, equivalente a una reducción del 31,9 %.
- Gas natural: la factura se reduce de 3170,67 € a 1606,90 €, es decir, un ahorro de 1563,77 € anuales, lo que representa una disminución del 49,3 %.

En conjunto, estos ahorros suponen una rebaja del 39,9 % en el gasto energético total, reforzando así la eficacia y rentabilidad de las medidas seleccionadas, incluso sin haber aplicado la totalidad de las propuestas iniciales.

Una vez definido el conjunto final de medidas viables y cuantificados sus efectos en términos de ahorro energético y económico, se analizaron distintos escenarios de financiación en función del reparto entre capital propio, préstamos y subvenciones públicas. Se evaluaron cinco opciones distintas, calculando para cada una de ellas el Valor Actual Neto (VAN), la

Tasa Interna de Retorno (TIR), tanto del proyecto como del equity; además del flujo de caja asociado.

Escenario	Aportación propia (€)	Subvención (€)	Préstamo (€)	VAN proyecto (€)	TIR proyecto (%)	VAN equity (€)	TIR equity (%)
Escenario 1	16552	0	0	7480,58	12,28	7480,58	12,28
Escenario 2	11586	4966	0	7480,58	12,28	12446,18	22,10
Escenario 3	8276	0	8276	7782,49	12,28	7289,46	18,18
Escenario 4	5793	4966	5793	7782,49	12,28	12402,97	35,52
Escenario 5	2317	4966	9269	7966,36	12,28	12310,10	70,27

Tabla 45: Comparativa de los escenarios planteados

Finalmente, se optó por el Escenario 5, que combina una subvención pública (30% del total de la inversión) con una financiación bancaria mayoritaria (80% de lo restante) y una aportación mínima de capital propio (20% de lo restante). Este modelo permite ejecutar el proyecto con una inversión personal muy reducida (2317 €) y aprovechar al máximo tanto la ayuda económica como el efecto del apalancamiento financiero. Aunque el VAN del proyecto se mantiene en niveles similares a otros escenarios (7966,36 €) y la TIR del proyecto no varía (12,28 %), la TIR del equity se dispara hasta el 70,27 %, lo que refleja una rentabilidad extraordinaria sobre el capital aportado. Además, el flujo de caja del proyecto es positivo desde el primer año, lo que garantiza una ejecución económicamente sostenible, se expondrán los flujos de dicho escenario más adelante.

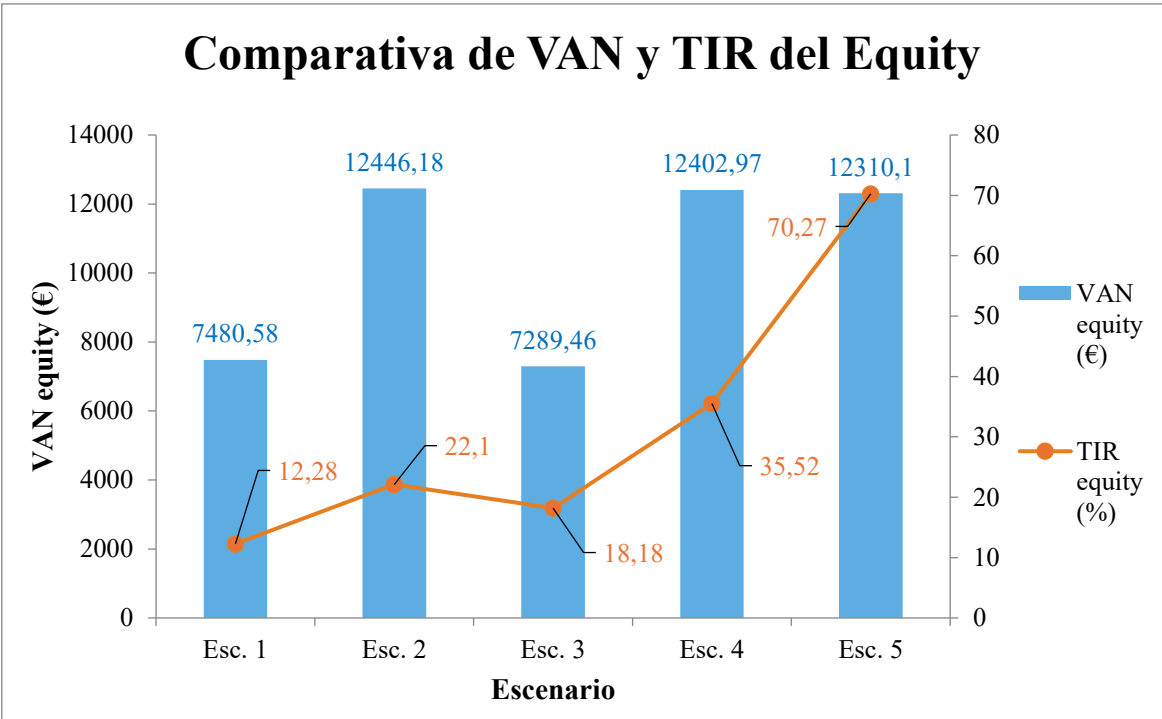


Figura 37: Comparativa de indicadores económicos del equity según el escenario

La elección de esta modalidad responde a un criterio de eficiencia y rentabilidad, ya que permite ejecutar el proyecto con una inversión mínima por parte del propietario, aprovechando tanto las subvenciones disponibles como las ventajas del apalancamiento financiero. Aunque implica asumir cierto coste por intereses (préstamo bancario alto), se ve compensado de sobra por los beneficios generados, ofreciendo una rentabilidad muy superior a la de otros escenarios. Se trata de un escenario realista y atractiva para un propietario particular, especialmente en un contexto como el actual, donde existen líneas de financiación accesibles y ayudas públicas que favorecen la inversión en eficiencia energética.

ESCENARIO 5	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
INVERSIÓN INICIAL	-16.552										
SUBVENCIÓN	4.966										
PRÉSTAMO	9.269										
Devolución préstamo		-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912	-926,912
Interés		-463,456	-417,1104	-370,7648	-324,4192	-278,0736	-231,728	-185,3824	-139,0368	-92,6912	-46,3456
Ahorro energético		2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963	2963
FLUJO NETO DE CAJA	-2.317	1.573	1.619	1.665	1.712	1.758	1.804	1.851	1.897	1.943	1.990

TIRe	70,27%	TIR	12,28%
VANe	12.310,10 €	VAN	7.966,36 €

Figura 40: Indicadores económicos tanto del equity como del proyecto del escenario seleccionado

La Figura 40 resume los resultados del escenario financiero finalmente seleccionado, correspondiente a la aplicación de las medidas económicamente viables, financiadas

mediante una combinación de subvención pública, financiación externa y una pequeña aportación de capital propio. El flujo de caja neto refleja una inversión inicial asumida por el propietario de tan solo 2317 €, frente a un ahorro energético anual constante de 2963 €, lo que garantiza un retorno positivo desde el primer año.

El resultado económico es claramente favorable, ya que el proyecto alcanza un Valor Actual Neto (VAN) de 7966,36 €, lo que demuestra que la inversión global es rentable. Sin embargo, lo más destacable es el rendimiento del capital propio invertido, la Tasa Interna de Retorno (TIR del equity) se eleva hasta un 70,27 %, reflejando una rentabilidad excepcional gracias al bajo esfuerzo económico inicial y al buen diseño de la estrategia financiera. Estos resultados confirman que el proyecto es viable, rentable y accesible, incluso para propietarios con recursos limitados, siempre que puedan acogerse a las ayudas disponibles y acceder a condiciones razonables de financiación.

Este proyecto ha puesto de manifiesto que mejorar la eficiencia energética en viviendas no solo es una necesidad para avanzar hacia los objetivos energéticos y climáticos, sino también una oportunidad clara desde el punto de vista económico. Los resultados lo demuestran con datos: reducir el consumo energético tiene un impacto directo y medible sobre la factura anual, y al mismo tiempo, permite disminuir las emisiones asociadas al uso de energía. Es decir, se trata de una intervención que beneficia tanto al propietario como al entorno.

A pesar de ello, sigue existiendo una barrera importante: el coste inicial de las inversiones, que muchas veces frena la toma de decisiones, sobre todo en el ámbito doméstico. Sin embargo, este trabajo también ha mostrado que hay formas de superar esa barrera, ya sea aprovechando subvenciones públicas o recurriendo a financiación parcial.

Además, teniendo en cuenta los niveles de rentabilidad alcanzados y los beneficios adicionales en sostenibilidad, todo apunta a que en los próximos años aumentará la disponibilidad de financiación específica para este tipo de proyectos. La eficiencia energética ya no es solo una buena idea, sino que es una inversión con sentido, con retorno y con impacto.

6. Referencias bibliográficas

- [1] *Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética*, Pub. L. No. Ley 7/2021, BOE-A-2021-8447 62009 (2021). <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>
- [2] ESEFICIENCIA. (2 de octubre de 2024). *La IEA guía en un informe para el objetivo de duplicar la eficiencia energética y triplicar las renovables*. <https://www.eseficiencia.es/2024/10/02/iea-guia-informe-objetivo-duplicar-eficiencia-energetica-triplicar-renovables>
- [3] *La eficiencia energética | Fichas temáticas sobre la Unión Europea | Parlamento Europeo*. (9 febrero de 2024). <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/69/la-eficiencia-energetica>
- [4] *Idescat. Indicadores de la Unión Europea. Consumo final de energía. Por sectores*. (2022). <https://www.idescat.cat/indicadors/?id=ue&lang=es&n=10157>
- [5] *PNIEC_2024_240924 - Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*. (septiembre de 2024). https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/energia/files-1/pniec-2023-2030/PNIEC_2024_240924.pdf
- [6] *DBHE. - Ministerio de vivienda y agenda urbana*. (14 de junio de 2022) <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- [7] *Figura 1: Power BI Report*. (s. f.). <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiNzY3YmE3NWItODdmMi00M2ZiLThjNGMtOGU0MWZhNDkyMjI4IiwidCI6ImQ3YmJmMmMyLWY2NzktNDdkOS05MzdjLTk2ZTdiNDgzNzcyZCIsImMiOiJ9>
- [8] *El Pacto Verde Europeo - Comisión Europea*. (14 de julio de 2021). https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es
- [9] *Objetivo 55: Hacer realidad las propuestas - Comisión Europea*. (s. f.). https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_es
- [10] *IESE Business School y Tinsa by Accumin*. (2025). *El 95% de las viviendas en España presentan ineficiencia energética*. <https://www.merca2.es/2025/01/27/el-95-de-las-viviendas-en-espana-presentan-ineficiencia-energetica-segun-un-estudio-reciente-2125353/>
- [11] *Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios*. (24 de abril de 2024). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. <https://www.miteco.gob.es/eu/energia/eficiencia/epbd2024.html>
- [12] *Actuaciones de Mejora Energética en Edificios*. (s. f.). *EuroEficiencia*. <https://euroeficiencia.es/actuaciones-de-mejora-energetica-en-edificios>
- [13] *Figura 4: Meteorología, A. E. de*. (s. f.). *Análisis estacional: Madrid Aeropuerto Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España*. https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/analisis_estacional?w=4&l=3129&datos=prec

- [14] *El clima en Madrid, el tiempo por mes, temperatura promedio (España)*—Weather Spark. (s. f.). <https://es.weatherspark.com/y/36848/Clima-promedio-en-Madrid-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [15] *Caldera Bosch GS3000 24 C23* (s.f.) https://www.junkers-bosch.es/ocsmidia/optimized/full/o506003v272_AAFF_JUBO_Ficha_Caldera_Gaz_Star.pdf
- [16] FTXS-G / RXS-G | Daikin. (s. f.) https://www.daikin.es/es_es/productos/product.html/FTXS-G---RXS-G.html
- [17] *Directiva (UE) 2018/ del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética.*
<https://www.boe.es/doue/2018/156/L00075-00091.pdf>
- [18] *PNIEC_2024_240924 - Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.* (septiembre de 2024). https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/pniec-2023-2030/PNIEC_2024_240924.pdf
- [19] Barrera Nicolas, Lorena (16 de septiembre de 2024) «*Etiqueta energética y clasificación de los electrodomésticos*». Selectra. <https://selectra.es/energia/info/que-es/etiqueta-energetica>
- [20] <<*Guía de ahorro y eficiencia energética e hídrica en el hogar*>>. Ayuntamiento de Murcia. https://cendocps.carm.es/documentacion/2024_Guia_ahorro_energia.pdf. [Consultado: 04-abr-2025].
- [21] A. Reinicia (6 de octubre de 2023) <<*Domótica: claves para ahorrar energía en tu hogar*>> <https://www.tualarmasincuentas.es/blog/ahorro-energetico-domotica/>
- [22] R. Diez (21 de julio de 2022) <<*Consumo fantasma: claves para entender qué es el consumo stand by*>> <https://watofy.com/info/blog/consumo-fantasma-claves-para-entender-que-es-el-consumo-stand-by/>.
- [23] Ecoisola <<*Ahorro en calefacción con aislamiento térmico*>> Ecoisola.es. <https://www.ecoisola.es/ahorro-calefaccion-con-aislamiento-termico/>
- [24] Ventanas Anerual, <<*Triple acristalamiento: ¿en qué consiste este diseño y cuáles son sus ventajas diferenciales?*>> <https://ventanasanerual.es/triple-acristalamiento-en-que-consiste-este-diseno-y-cuales-son-sus-ventajas-diferenciales/>.
- [25] European Commission, Joint Research Centre (JRC) <<*Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*>> 2024. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/tools.html.
- [26] European Commission, Joint Research Centre (JRC) <<*Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*>> 2024. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/tools.html.
- [27] Hoja de datos de Tesla Powerwall 2

- [28] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) <<Guía Profesional de Tramitación del Autoconsumo>> 2021. <https://www.idae.es/publicaciones/guia-profesional-de-tramitacion-del-autoconsumo>.
- [29] Junkers Bosch <<¿Cuáles son las calderas más eficientes?>> 2023. <https://www.junkers-bosch.es/conocimiento/calefaccion/cuales-son-las-calderas-mas-eficientes/>.
- [30] Amazon.es. <https://www.amazon.es/bombilla-led-7w/s?k=bombilla+led+7w>
- [31] Leroymerlin. <https://www.leroymerlin.es/productos/detector-de-presencia-real-empotrar-garza-360-92169327.html>.
- [32] Amazon.es. https://www.amazon.es/Nivian-Enchufe-inteligente-Wifi-3680W-Protecci%C3%B3n-sobretensiones-energ%C3%A9tica-Compatible/dp/B08XC49KPF/ref=sr_1_22?sr=8-22
- [33] Manomano.es. https://www.manomano.es/p/ventana-pvc-500x800-blanca-oscilobatiente-izquierda-vidrio-mate-68372715?product_id=126247812
- [34] Cronoshare.com <<¿Cuánto cuesta instalar calefacción eléctrica?>> 2024. <https://www.cronoshare.com/cuanto-cuesta/instalar-calefaccion-electrica>
- [35] Rhonatherm. <<¿Cuál es el precio por m2 de fachadas con sistema SATE?>> 2023. <https://www.saterhonatherm.com/blog/precio-m2-sate-fachada/>
- [36] <<Aislamiento termoacústico de suelos flotantes, con lanas minerales>> https://carm.generadordeprecios.info/obra_nueva/Aislamientos_e_impermeabilizaciones/NV_Aislamientos_termicos_de_orige/Suelos_flotantes/NVL010_Aislamiento_termico_de_suelos_radia.html
- [37] <<Aislamiento térmico de cubierta plana, no ventilada, con impermeabilización líquida>> https://carm.generadordeprecios.info/obra_nueva/Aislamientos_e_impermeabilizaciones/Aislamientos_termicos/Cubiertas_planas/NAU050_Aislamiento_termico_de_cubierta_pla.html
- [38] Autosolar.es. <https://autosolar.es/panel-solar-24-voltios/panel-ja-solar-450w-24v-monocristalino-perc>
- [39] Tienda Solar. <<Comprar Batería TESLA POWERWALL 2 AC al mejor precio>> <https://tienda-solar.es/es/baterias-placas-solares/1728-bateria-tesla-powerwall-2-ac-135kwh>
- [40] T. Gallardo, <<Wallbox introduce la carga bidireccional para coches eléctricos en España>>, ZeemGO <https://zeemgo.com/es/wallbox-introduce-la-carga-bidireccional-para-coches-electricos-en-espana/>
- [41] Sma.de. <<Sunny Home Manager 2.0>> <https://www.sma.de/es/productos/monitorizacion-y-control/sunny-home-manager>
- [42] Emetebetecnicos. <<CERAPUR-ACU SMART ZWSB 24/30-4 E>> <https://www.emetebetecnicos.com/es/productos/calderas/gas/cerapur-acu-smart-zwsb-24-30-4-e/>

[43] Acae. <<*Acae Presto*>> , https://www.acae.es/BD/-1X160/EM/EM23/VISSMANN/VISSMANN/EQCF_VIE/EQCFE_VIE/PVIEZK02454/vi-tosol-200-fm-sh2f-2-3-m---horizontal.html

[44] Idae.es. <<*Programa PREE 5000. Rehabilitación energética de edificios en municipios de reto demográfico*>> , <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-la-rehabilitacion-de-edificios/programa-pree-5000-rehabilitacion>

[45] Gob.es. <<*Plan de rehabilitación de vivienda y regeneración urbana*>> , <https://planderecuperacion.gob.es/politicas-y-componentes/componente-2-plan-de-rehabilitacion-de-vivienda-y-regeneracion-urbana>

[46] España, Comunidad de Madrid (25 de mayo de 2023), <<*Ayudas a las actuaciones de rehabilitación energética de edificios residenciales y viviendas*>> <https://www.comunidad.madrid/servicios/vivienda/ayudas-actuaciones-rehabilitacion-energetica-edificios-residenciales-viviendas-prtr>