



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**AUDITORÍA ENERGÉTICA Y MODELO
ECONÓMICO DE UNA INSTALACIÓN
RESIDENCIAL: EVALUACIÓN DE
INTERVENCIONES Y PROPUESTAS A
FUTURO**

Autor: Álvaro Echegoyen Vogel

Director: Íñigo Sanz Fernández

Madrid,

Junio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Auditoría energética y modelo económico de una instalación residencial: análisis de
intervenciones y propuestas a futuro**

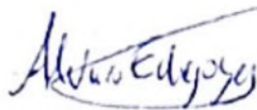
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

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

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Álvaro Echegoyen Vogel

Fecha: 13 / 05 / 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

SANZ
FERNANDEZ
IÑIGO -
52367115W

Firmado digitalmente
por SANZ FERNANDEZ
IÑIGO - 52367115W
Fecha: 2025.06.06
11:24:19 +02'00'

Fdo.: Íñigo Sanz Fernández

Fecha: 13 / 05 / 2025



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**AUDITORÍA ENERGÉTICA Y MODELO
ECONÓMICO DE UNA INSTALACIÓN
RESIDENCIAL: EVALUACIÓN DE
INTERVENCIONES Y PROPUESTAS A
FUTURO**

Autor: Álvaro Echegoyen Vogel

Director: Íñigo Sanz Fernández

Madrid,

Junio de 2025

Agradecimientos

A mis padres, por acompañarme y apoyarme siempre. Que esto sirva como un pequeño tributo por todo lo que me han dado a lo largo de estos años.

A mi hermano, por ser un ejemplo de lucha y por su interés constante en el progreso y los resultados de este proyecto.

A Íñigo, por ser un gran apoyo, aportando consejos valiosos y ayuda durante todo el año.

Y a ICAI, por todo lo aprendido en estos seis años. Esto marca el fin de una etapa que me ha aportado mucho como persona y que, sin duda, me acompañará toda mi vida.

AUDITORÍA ENERGÉTICA Y MODELO ECONÓMICO DE UNA INSTALACIÓN RESIDENCIAL: ANÁLISIS DE INTERVENCIONES Y PROPUESTAS A FUTURO

Autor: Echegoyen Vogel, Álvaro.

Director: Sanz Fernández, Íñigo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo evalúa el comportamiento energético de una vivienda urbana mediante una auditoría integral, proponiendo un modelo sistemático y replicable. En él se realiza una descripción de la condición actual de la instalación, a partir de la cual incidir en ineficiencias y oportunidades de mejora. Para ello, se analizan intervenciones pasadas y se proponen potenciales medidas, estimando los impactos energéticos, económicos y ambientales. Los distintos análisis de sensibilidad permiten contemplar la variabilidad de escenarios futuros, permitiendo una comparación realista de cada propuesta.

Palabras clave: energía, eficiencia energética, auditoría energética, sostenibilidad, vivienda urbana, mix energético, modelo económico.

1. Introducción

En los últimos años, la volatilidad extrema en los precios del gas [1] y la electricidad [2] — agravada por la pandemia y la guerra en Ucrania — ha provocado la necesidad de optimizar el consumo energético. Esta situación ha tenido consecuencias notables como el aumento de la pobreza energética, afectando especialmente a los hogares más vulnerables.

Al mismo tiempo, la elevada dependencia de fuentes fósiles sigue generando un fuerte impacto ambiental y de salud pública. Según estimaciones de la OMS [3], en torno a 6,7 millones de muertes prematuras se asocian anualmente a la contaminación del aire.

En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo establecer una hoja de ruta para afrontar estos desafíos, proporcionando una herramienta práctica que permita tomar decisiones informadas en materia de eficiencia energética en el hogar.

2. Definición del proyecto y metodología empleada

El modelo de análisis energético se estructura en cinco fases estratégicas que componen una visión integral y personalizada respecto a la eficiencia energética en el hogar.

En la fase I se aborda un estudio sectorial exhaustivo que describe las tendencias emergentes, retos y patrones del mercado energético, destacando innovaciones clave que impactan el sector residencial. Una vez comprendida la situación actual del sector, la fase II presenta un análisis detallado de la instalación, definiendo los distintos consumos existentes y analizando su evolución histórica, obteniendo patrones anuales, mensuales, diarios y horarios. Esto facilita una comprensión precisa del comportamiento energético de la vivienda objeto de estudio.

A continuación, la fase III se enfoca en la caracterización energética de la vivienda, con una búsqueda activa de ineficiencias y oportunidades de optimización. También se compara la eficiencia teórica de la vivienda (última certificación energética) con la real (consumo histórico). En la fase IV se evalúan las intervenciones pasadas, las cuales incluyen el cambio

de ventanas realizado a finales de 2022 y el aumento de potencia contratada en verano de 2024. El objetivo es analizarlas con retrospectiva y extraer lecciones clave útiles para garantizar la efectividad de futuras mejoras.

Finalmente, la fase V propone un modelo sistemático para evaluar potenciales soluciones en el ámbito energético, ejemplificándolo con diversas propuestas a problemas encontrados en la fase III. Para la valoración de las distintas medidas se definen criterios basados en eficiencia energética, rentabilidad económica e impacto ambiental.

El modelo propuesto en este proyecto ofrece un análisis metódico y replicable para cada instalación energética, siendo este uno de los principales objetivos. No obstante, también ofrece un alto nivel de detalle y adecuación para cada casuística particular.

3. Breve descripción de los análisis realizados

En lo relacionado con las intervenciones previas realizadas en la vivienda objeto del proyecto, se ha analizado tanto el cambio de las ventanas como el aumento en la potencia contratada.

Para el primer caso, se ha medido el impacto real en el consumo, cuantificando los ahorros energéticos y de emisiones, y elaborando un modelo económico. Para el ahorro energético anual, se han ponderado factores externos como variaciones en las temperaturas medias anuales, además de lo hallado en la fase II. Tras ello, las emisiones se han razonado usando factores de conversión de energía final a primaria, incluyendo pérdidas en generación y transporte, y aplicando factores de emisión (kg CO₂/kWh). Para el modelo definido, se han proyectado 35 años por la alta calidad y durabilidad de las ventanas seleccionadas, superior a la media del mercado.

Para el segundo caso, se ha desarrollado un método para el cálculo de la potencia contratada óptima en una instalación. En éste se emplean los patrones de uso reales de los equipos en el día a día para poder distinguir entre circuitos generales (activos en cualquier momento) y circuitos especiales (nunca hay simultaneidad entre ellos), imponiendo posteriormente factores de utilización y simultaneidad a cada carga.

En cuanto a las medidas de optimización, analizando la instalación se han encontrado cuatro principales ineficiencias u oportunidades de mejora para las cuales se han realizado y evaluado las siguientes propuestas:

- Nula presencia de generación renovable: sistema de autoconsumo solar fotovoltaico sin almacenamiento ni vertido.
- Fuerte dependencia del aire acondicionado: sustitución de las actuales unidades de AC o mantenimiento preventivo de las mismas para la prolongación de su vida útil.
- Elevado consumo de gas: sustitución de la caldera de gas por una bomba de calor de aerotermia.
- Sobredimensionamiento de la potencia contratada: almacenamiento en baterías para cubrir picos de demanda puntuales o cambio de conexión monofásica a trifásica.

El análisis de cada propuesta parte de la descripción técnica de la tecnología implicada y su correspondiente dimensionamiento y selección de equipos. Tras ello, se estima el impacto en el consumo y, consecuentemente, en las emisiones. En lo económico, cada propuesta tiene asociado un modelo con una serie de hipótesis y estimaciones. A continuación, se adjunta un ejemplo de modelo económico, en este caso para la propuesta 5.2 de instalación fotovoltaica:

	2025	2026	2027	2028	...	2047	2048	2049	2050
Año	0	1	2	3	...	22	23	24	25
Inflación	1	1,02	1,05	1,07	...	1,65	1,69	1,73	1,77
"Ingresos" o ahorros									
Generación anual renovable FV (kWh)		1.622	1.618	1.614	...	1.539	1.535	1.531	1.527
Coste variable Plan Estable (€/kWh)	0,140	0,143	0,146	0,150	...	0,231	0,236	0,242	0,247
<i>Crecimiento coste variable electricidad</i>		2,31%	2,31%	2,31%	...	2,31%	2,31%	2,31%	2,31%
Ahorro tarifa variable elect. (€)		232	237	242	...	355	363	370	378
Ahorro impuesto electricidad (5,1%)		11,8	12,1	12,3	...	18,1	18,5	18,9	19,3
Ahorro IVA (21%)		51,2	52,2	53,3	...	78,5	80,1	81,7	83,4
Ahorro (€)		295	301	307	...	452	461	471	480
Deducción por subvenciones	458								
Costes									
CAPEX Obra	(2.290)								
OPEX Mantenimiento		(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)
EBITDA	(1.832)	145	151	157	...	302	311	321	330
D&A		(92)	(92)	(92)	...	(92)	(92)	(92)	(92)
EBIT	(1.832)	53	59	66	...	210	220	229	239
FCF	(1.832)	145	151	157	...	302	311	321	330

Figura 1. Ejemplo de modelo económico (instalación FV) [Elaboración propia]

Y, con el objetivo de contemplar posibles errores en estimaciones del modelo, y dar una visión más realista de cada propuesta, se han acompañado los modelos de análisis de sensibilidad como el siguiente:

		Crecimiento anual precio electricidad (%)					
		9,7%	-1,0%	1,0%	2,3%	3,0%	4,0%
Costes OPEX anuales (€)	100	7,0%	10,4%	12,4%	13,4%	14,9%	
	125	4,9%	8,8%	11,1%	12,1%	13,7%	
	150	2,6%	7,2%	9,7%	10,8%	12,5%	
	175	-0,2%	5,6%	8,3%	9,5%	11,3%	
	200	-4,3%	3,8%	6,9%	8,2%	10,2%	

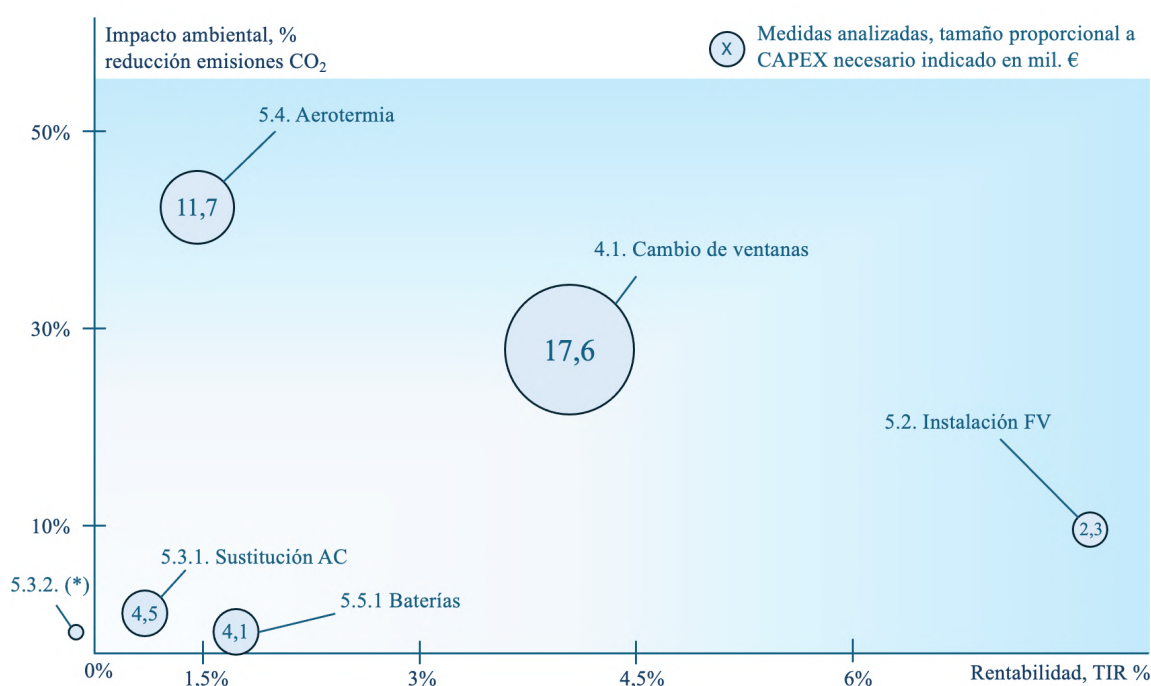
Figura 2. Ejemplo de análisis de sensibilidad (instalación FV) [Elaboración propia]

4. Resultados

- Tras analizar los patrones de uso y consumos energéticos (5.650 kWh eléctricos y 18.000 kWh térmicos anuales), se ha caracterizado la eficiencia energética de la vivienda: 121 kWh/m² y 30,1 kg CO₂/m² (clase D), mejorando en un 28% y 8% las estimaciones del software CEXv2.3 en diciembre de 2022, respectivamente. Esto se justifica gracias a mejores hábitos de consumo y equipos más eficientes que los estándares del software. La no proporcionalidad en la reducción de emisiones obtenida se justifica por una mayor presencia del gas en el mix del hogar respecto a la media española.
- Respecto a las intervenciones pasadas, el cambio de ventanas ha supuesto una reducción del consumo anual de 1.050kWh en electricidad y 8.250kWh en gas. Esto se traduce en

una reducción del consumo del 28% y una reducción de 2.937kg de CO₂ emitidos al año (27%). Adicionalmente, con las hipótesis expuestas, esta medida tiene una TIR del 4,1% con un *payback* de 20,5 años; lo cual se ha considerado moderadamente positivo en el contexto del hogar. También hay que considerar beneficios no económicos como la mejora en el aislamiento acústico, el confort o la estética.

- La potencia contratada óptima resultante es de 11,85kW, siendo por ende el aumento de 8,5 a 12 kW acertado y necesario según el modelo establecido de cálculo de la potencia óptima. No obstante, se ha detectado una alta influencia de los equipos de aire acondicionado en esta decisión.
- En cuanto a las propuestas para las cuatro ineficiencias y/o oportunidades de mejora identificadas en el análisis de la instalación, la comparativa de impacto ambiental, rentabilidad y CAPEX necesario para cada una de ellas (incluyendo el cambio de ventanas) puede apreciarse en el siguiente gráfico:



*Figura 3. Comparativa de impacto de las propuestas a futuro e intervenciones previas
[Elaboración propia]*

- En concreto, la propuesta que mayor reducción de emisiones ofrece es la aerotermia con un 44%, seguida del cambio de ventanas (27%). En tercer lugar, se sitúa la instalación FV con un 9%. El resto de las propuestas tienen un mínimo impacto en el ámbito medioambiental.
- En términos económicos, la propuesta más atractiva es la fotovoltaica con una TIR base del 9,7%. Tras ésta, destaca el cambio de ventanas (4,1%). El resto de las medidas tienen bajas rentabilidades de en torno al 1%, que se ven muy afectadas por las hipótesis realizadas en los precios de la electricidad y/o el gas en los próximos años. Las posibles rentabilidades de cada propuesta se pueden ver en cada análisis de sensibilidad que, por ejemplo, en la aerotermia oscilan entre -7% (escenario bajista para el gas y alcista para la electricidad, poco probable) y +9,5% (escenario alcista para el gas y bajista para la electricidad, más probable).
- Por último, también se pondera el CAPEX estimado de cada propuesta, desglosado en base al dimensionamiento y la selección de equipos. Los más intensivos son el cambio

de ventanas (17.600€) y la aerotermia (11.700€), mientras que el resto se sitúan en el rango de 2.000 a 4.500€. Destaca la propuesta 5.3.2 (mantenimiento preventivo del AC) por su nulo CAPEX, prolongando además la vida útil de las unidades actuales, pero con un menor impacto energético.

5. Conclusiones

Este trabajo ha permitido evaluar en profundidad el comportamiento energético de una vivienda urbana, auditando sus consumos y actuaciones pasadas, y proponiendo mejoras desde un enfoque técnico, económico y medioambiental. Se ha logrado construir un modelo sistemático y replicable, útil para la toma de decisiones y la educación energética de la población.

Los resultados muestran disparidad en impactos y rentabilidades entre propuestas, siendo importante el uso de análisis de sensibilidad para contemplar la variabilidad de escenarios. Asimismo, se han identificado soluciones con fuerte potencial de descarbonización (aerotermia y cambio de ventanas principalmente), y otras con alta rentabilidad (instalación fotovoltaica sin vertido ni excedentes), permitiendo priorizar acciones en función de múltiples criterios. En concreto, se han evaluado positivamente tanto el cambio de ventanas como el aumento de la potencia contratada, y se ha identificado un alto atractivo en las propuestas de generación fotovoltaica y aerotermia.

El trabajo realizado demuestra la importancia de combinar tecnologías (aislamiento, autoconsumo, aerotermia, etc.) en función del contexto, y resalta que la ingeniería aplicada debe ser integral y combinar múltiples factores como eficiencia, sostenibilidad, rentabilidad, accesibilidad, estética o confort.

6. Referencias

- [1] U.S. Energy Information Administration (EIA). (Junio de 2024). “Electricity generation from renewables surpassed coal for the first time in 2021”. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=62203> [Accedido: 26 de septiembre de 2024].
- [2] Maygmo, (Abril de 2024). “Evolución precio de la luz en España desde 2020 hasta 2024”. Disponible en: <https://maygmo.es/explora-la-evolucion-del-precio-de-la-luz-en-espana-desde-2020-hasta-2024/> [Accedido: 28 de septiembre de 2024]
- [3] OMS. (Diciembre de 2022). “Contaminación del aire ambiente (exterior)”. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) [Accedido: 28 de septiembre de 2024]

ENERGY AUDIT AND ECONOMIC MODEL OF A RESIDENTIAL INSTALLATION: ANALYSIS OF PAST INTERVENTIONS AND FUTURE PROPOSALS

Author: Echegoyen Vogel, Álvaro.

Supervisor: Sanz Fernández, Íñigo.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This work evaluates the energy performance of an urban dwelling through a comprehensive audit, proposing a systematic and replicable model. It includes a description of the current condition of the installation, from which to identify inefficiencies and improvement opportunities. For this purpose, past interventions are analyzed, and potential measures are proposed, estimating their energy, economic, and environmental impacts. Various sensitivity analyses are conducted to account for the variability of future scenarios, enabling a realistic comparison of each proposal.

Keywords: energy, energy efficiency, energy audit, sustainability, energy mix, urban housing, economic model.

1. Introduction

In recent years, the extreme volatility in gas [1] and electricity prices [2] — exacerbated by the pandemic and the war in Ukraine—has created a pressing need to optimize energy consumption. This situation has led to significant consequences, such as a rise in energy poverty, particularly affecting the most vulnerable households.

At the same time, the heavy dependence on fossil fuels continues to generate severe environmental and public health impacts. According to WHO estimates [3], around 6.7 millions of premature deaths are linked annually to air pollution.

In this context, the aim of this project is to establish a roadmap to address these challenges, providing a practical tool to support informed decision-making regarding energy efficiency in residential settings.

2. Project definition and methodology used

The energy analysis model is structured into five strategic phases, providing a comprehensive and personalized view of home energy efficiency.

In Phase I, a thorough sectoral study is conducted, analyzing trends, challenges, and patterns in the energy market, highlighting key innovations in the residential sector. In Phase II, a detailed analysis of the installation is carried out, identifying consumption patterns and their historical evolution through annual, monthly, daily, and hourly data, allowing for a clear understanding of the case-study home's energy behavior.

Furthermore, phase III focuses on the energy characterization of the home, identifying inefficiencies and opportunities for improvement, and comparing theoretical efficiency (energy certification) with actual efficiency (historical consumption). In Phase IV, past interventions are evaluated, such as the window replacements in 2022 and the increase in contracted power in 2024, to extract lessons that will optimize future improvements.

Finally, Phase V proposes a systematic model for evaluating energy solutions, illustrated with specific proposals from Phase III. The measures are assessed based on energy efficiency, economic profitability, and environmental impact criteria. This model provides a methodical and replicable analysis for each installation, with a detailed and tailored approach for each particular case.

3. Brief description of the analyses performed

Regarding the previous interventions of the case-study dwelling, both the change of windows and the increase in contracted power have been analyzed.

For the first case, the actual impact on consumption has been measured, quantifying energy and emissions savings, and creating an economic model. For the annual energy savings, external factors such as variations in average annual temperatures were also considered, in addition to the data from Phase II. The emissions were calculated using energy conversion factors from final to primary energy, including losses in generation and transportation, and applying emission factors (kg CO₂/kWh). The defined model is projected over 35 years due to the high quality and durability of the windows, which exceed the market average.

As for the second case, a reasoning process has been developed for calculating the optimal contracted power for a facility. This process employs actual usage patterns of the equipment to distinguish between general circuits (active at any given moment) and special circuits (no simultaneity at any time), applying utilization and simultaneity factors to each load.

Furthermore, analyzing the installation, four main inefficiencies or improvement opportunities were identified, for which the following proposals were made and evaluated:

- Lack of renewable generation: photovoltaic solar self-consumption system without storage or feed-in.
- Strong dependence on air conditioning: replacement of current AC units or preventive maintenance to extend their lifespan.
- High gas consumption: replacement of the gas boiler with an aerothermal heat pump.
- Oversized contracted power: battery storage to cover occasional demand peaks or conversion from single-phase to three-phase connection.

The analysis of each proposal begins with the technical description of the involved technology, including its sizing and equipment selection. After that, the impact on consumption and, consequently, on emissions is estimated. Economically, each proposal has an associated model with a series of hypotheses and estimates. Below is an example of the economic model, in this case for the 5.2 photovoltaic installation proposal:

	2025	2026	2027	2028	...	2047	2048	2049	2050
Año	0	1	2	3	...	22	23	24	25
Inflación	1	1,02	1,05	1,07		1,65	1,69	1,73	1,77
"Ingresos" o ahorros									
Generación anual renovable FV (kWh)		1.622	1.618	1.614	...	1.539	1.535	1.531	1.527
Coste variable Plan Estable (€/kWh)	0,140	0,143	0,146	0,150	...	0,231	0,236	0,242	0,247
Crecimiento coste variable electricidad		2,31%	2,31%	2,31%	...	2,31%	2,31%	2,31%	2,31%
Ahorro tarifa variable elect. (€)		232	237	242	...	355	363	370	378
Ahorro impuesto electricidad (5,1%)		11,8	12,1	12,3	...	18,1	18,5	18,9	19,3
Ahorro IVA (21%)		51,2	52,2	53,3	...	78,5	80,1	81,7	83,4
Ahorro (€)		295	301	307	...	452	461	471	480
Deducción por subvenciones	458								
Costes									
CAPEX Obra	(2.290)								
OPEX Mantenimiento		(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)
EBITDA	(1.832)	145	151	157	...	302	311	321	330
D&A		(92)	(92)	(92)	...	(92)	(92)	(92)	(92)
EBIT	(1.832)	53	59	66	...	210	220	229	239
FCF	(1.832)	145	151	157	...	302	311	321	330

Figure 1. Example of economic model (PV installation) [Own elaboration]

And, with the aim of accounting for potential errors in the model's estimates and providing a more realistic view of each proposal, the analysis models have been accompanied by sensitivity analysis, as shown below:

		Crecimiento anual precio electricidad (%)				
	9,7%	-1,0%	1,0%	2,3%	3,0%	4,0%
Costes OPEX anuales (€)	100	7,0%	10,4%	12,4%	13,4%	14,9%
	125	4,9%	8,8%	11,1%	12,1%	13,7%
	150	2,6%	7,2%	9,7%	10,8%	12,5%
	175	-0,2%	5,6%	8,3%	9,5%	11,3%
	200	-4,3%	3,8%	6,9%	8,2%	10,2%

Figure 2. Example of sensitivity analysis (PV installation) [Own elaboration]

4. Results

- After analyzing the usage patterns and energy consumption (5,650 kWh of electricity and 18,000 kWh of thermal energy annually), the energy efficiency of the house has been characterized as: 121 kWh/m² and 30.1 kg CO₂/m² (class D), improving by 28% and 8% compared to the estimates from the CEXv2.3 software in December 2022, respectively. This improvement is attributed to better consumption habits and more efficient equipment than the software's standards. The lack of proportionality in the emissions reduction is explained by a higher share of natural gas in the household energy mix compared to the Spanish average.

- Regarding past interventions, the window replacement has resulted in an annual reduction of 1,050 kWh in electricity and 8,250 kWh in gas consumption. This translates into a 28% reduction in consumption and a decrease of 2.937 kg of CO₂ emissions per year (27%). Additionally, with the given assumptions, this measure has an internal rate of return (IRR) of 4.1% and a payback period of 20.5 years, which has been considered moderately positive in the household context. Non-economic benefits, such as improved sound insulation, comfort, and aesthetics, should also be considered.
- The resulting optimal contracted power is 11.85 kW, making the increase from 8.5 kW to 12 kW accurate and necessary according to the established optimal power calculation model. However, a high influence from the air conditioning units has been detected in this decision.
- Regarding the proposals for the four identified inefficiencies and/or improvement opportunities from the installation analysis, the comparative impact on the environment, profitability, and CAPEX required for each one (including window replacement) can be seen in the following chart:

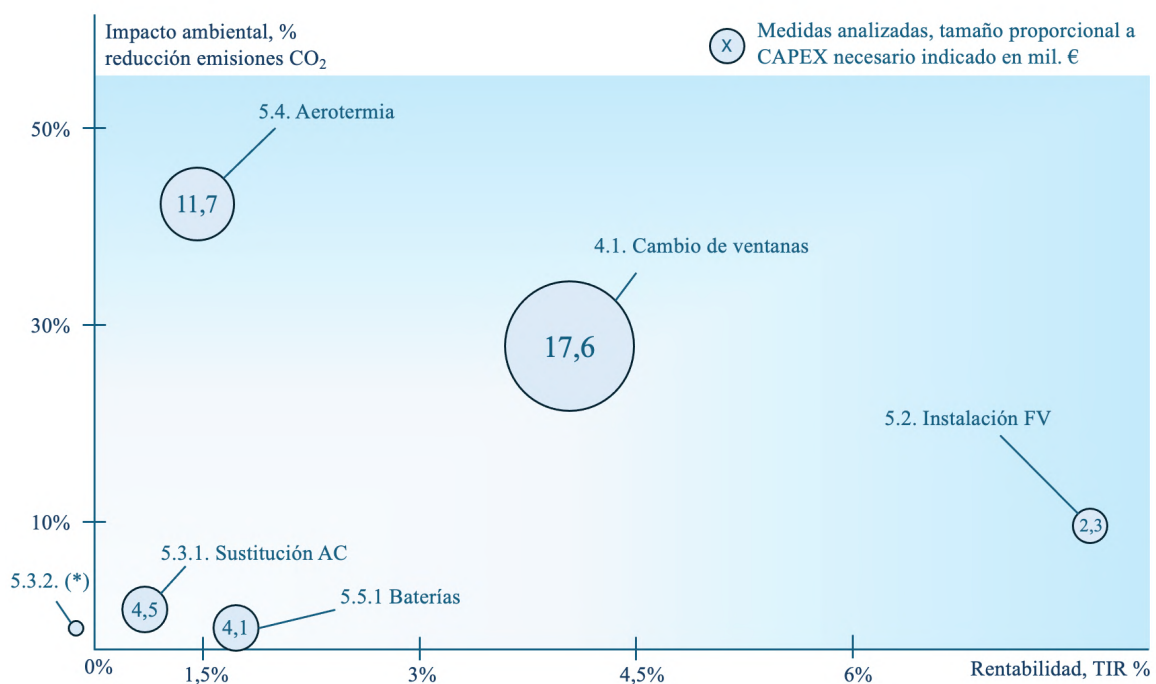


Figure 3. Comparison of the impact of future proposals and past interventions [Own elaboration]

- Specifically, the solution offering the greatest emissions reduction is aerothermal energy with 44%, followed by the window replacement (27%). In third place is the photovoltaic installation with 9%. The remaining proposals have minimal environmental impact.
- In terms of economics, the most attractive proposal is the photovoltaic system with a base IRR of 9.7%. Next is the window replacement (4.1%). The other measures have low returns around 1%, which are highly affected by assumptions made regarding electricity and/or gas prices in the coming years. The potential returns for each proposal can be found in the sensitivity analysis, which, for example, in the case of aerothermal energy ranges between -7% (bearish gas and bullish electricity scenario, unlikely) and +9.5% (bullish gas and bearish electricity scenario, more likely).

- Finally, the estimated CAPEX for each proposal is also considered, broken down based on the sizing and equipment selection. The most capital-intensive are the window replacement (€17,600) and the aerothermal system (€11,700), while the rest fall in the range of €2,000 to €4,500. Notably, proposal 5.3.2 (preventive maintenance of the AC) stands out for its zero CAPEX, while also extending the life of the current units.

5. Conclusions

This work has allowed for an in-depth evaluation of the energy behavior of a real urban home, auditing its consumption and past actions, and proposing improvements from a technical, economic, and environmental perspective. A systematic and replicable model has been constructed, useful for decision-making and the energy education of the public.

The results show a disparity in impacts and profitability between proposals, with sensitivity analysis being important to account for scenario variability. Furthermore, solutions with strong decarbonization potential (mainly aerothermal systems and window replacements) and others with high profitability (photovoltaic installation without excess generation or export) have been identified, enabling the prioritization of actions based on multiple criteria. Specifically, the window replacement and increase in contracted power have been positively assessed, and high potential has been identified in the photovoltaic and aerothermal proposals.

The work performed demonstrates the importance of combining technologies (windows, self-consumption, aerothermal systems, etc.) based on the context, and emphasizes that applied engineering must be comprehensive, combining multiple factors such as efficiency, sustainability, profitability, accessibility, aesthetics, and comfort.

6. Bibliography

- [1] U.S. Energy Information Administration (EIA). (Junio de 2024). “Electricity generation from renewables surpassed coal for the first time in 2021”. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=62203> [Accessed: September 2024].
- [2] Maygmo, (Abril de 2024). “Evolución precio de la luz en España desde 2020 hasta 2024”. Available: <https://maygmo.es/explora-la-evolucion-del-precio-de-la-luz-en-espana-desde-2020-hasta-2024/> [Accessed: September 2024]
- [3] OMS. (Diciembre de 2022). “Contaminación del aire ambiente (exterior)”. Available: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) [Accessed: September 2024]

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto	9
1.2 Objetivos del proyecto	9
1.3 Alineación con Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	10
1.4 Metodología del trabajo	11
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	14
Capítulo 3. Análisis energético de la vivienda.....	26
3.1 Descripción de la instalación	26
3.2 Listado de equipos	28
3.2.1 Equipos de iluminación.....	28
3.2.2 Electrodomésticos	29
3.2.3 Calefacción y refrigeración	31
3.3 Análisis del consumo energético.....	34
3.3.1 Consumo de electricidad.....	34
3.3.2 Consumo de gas	44
3.4 Caracterización de la eficiencia energética	50
Capítulo 4. Estudio de intervenciones previas.....	55
4.1 Cambio de ventanas	55
4.1.1 Impacto en el consumo.....	61
4.1.2 Modelo económico	64
4.2 Aumento de la potencia eléctrica contratada	69
4.3 Lecciones aprendidas de las intervenciones realizadas.....	74
Capítulo 5. Propuestas de mejora a futuro.....	76
5.1 Justificación de las mejoras propuestas.....	76
5.2 Instalación solar fotovoltaica	78
5.2.1 Descripción Técnica.....	78
5.2.2 Impacto en el consumo y medioambiente.....	82
5.2.3 Modelo económico	83

5.3	Análisis del aire acondicionado	89
5.3.1	Sustitución de los equipos actuales.....	89
5.3.2	Optimización de los equipos actuales	97
5.3.3	Nuevo modelo: renting.....	101
5.4	Alternativa a la caldera de gas: Aerotermia	102
5.4.1	Descripción Técnica.....	102
5.4.2	Dimensionamiento y diseño de la instalación.....	104
5.4.3	Impacto en el consumo y medioambiente.....	106
5.4.4	Modelo económico	108
5.5	Almacenamiento y conexión trifásica.....	113
5.5.1	Almacenamiento	113
5.5.2	Conexión trifásica	124
5.6	Resultados y viabilidad de las propuestas.....	131
Capítulo 6.	Conclusiones del proyecto.....	135
6.1	Aportaciones	135
6.2	Cumplimiento de objetivos	137
6.3	Lecciones aprendidas	139
6.4	Trabajos futuros	141
Capítulo 7.	Bibliografía.....	143
Anexo I	150	
Anexo II	152	
Anexo III	154	
Anexo IV	156	

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo de modelo económico (instalación FV) [Elaboración propia].....	11
Figura 2. Ejemplo de análisis de sensibilidad (instalación FV) [Elaboración propia]	11
Figura 3. Comparativa de impacto de las propuestas a futuro e intervenciones previas [Elaboración propia]	12
Figura 4. Volatilidad del precio del gas natural 2019-2024. [1].....	7
Figura 5. Cronograma completo del proyecto (Elaboración propia).....	13
Figura 6. Mejoras porcentuales en reducción de la intensidad energética 2001-2030 [11]	16
Figura 7. Ejemplo de certificado de eficiencia energética [14]	18
Figura 8. Evolución del consumo de energía primaria y final en la UE (2005-2022 y objetivo 2030) [17]	19
Figura 9. Evolución de la potencia instalada de solar FV autoconsumo en España [24]....	23
Figura 10. Plano de la instalación de estudio	27
Figura 11. Consumo mensual de electricidad septiembre 21 a octubre 24 [Elaboración propia].....	35
Figura 12. Análisis patrones de consumo de la instalación [Elaboración propia].....	36
Figura 13. Consumo diario de electricidad enero 2024 [Elaboración propia].....	36
Figura 14. Consumo diario de electricidad julio 2024 [Elaboración propia]	37
Figura 15. Consumo diario de electricidad agosto 2024 [Elaboración propia]	37
Figura 16. Consumo horario de electricidad: martes 9 de enero de 2024 [Elaboración propia]	38
Figura 17. Consumo horario de electricidad: miércoles 17 de enero de 2024 [Elaboración propia].....	39
Figura 18. Consumo horario de electricidad: domingo 21 de enero de 2024 [Elaboración propia].....	39
Figura 19. Consumo horario de electricidad: jueves 11 de julio de 2024 [Elaboración propia]	39
Figura 20. Consumo horario de electricidad: miércoles 24 de julio de 2024 [Elaboración propia].....	40

Figura 21. Evolución consumo vs factura electricidad [Elaboración propia]	42
Figura 22. Consumo y facturación electricidad septiembre 21 a noviembre 24 [Elaboración propia].....	43
Figura 23. Consumo de gas de diciembre 2022 a noviembre 2024 [Elaboración propia] ..	44
Figura 24. Análisis consumo de gas diciembre 2022 a noviembre 2024 [Elaboración propia]	45
Figura 25. Consumo vs factura de gas diciembre 21 a noviembre 24 [Elaboración propia]	48
Figura 26. Detalle consumo de gas diciembre 22 a noviembre 24 [Elaboración propia].....	49
Figura 27. Certificado energético post-intervención (diciembre 2022)	52
Figura 28. Certificado energético pre-intervención (mayo 2022)	59
Figura 29. Propuesta de mejora de ventanas (aislamiento)	60
Figura 30. Parámetros económicos del modelo de cambio de ventanas [Elaboración propia]	68
Figura 31. Principales métricas financieras de la propuesta FV [Elaboración propia]	87
Figura 32. Principales métricas económicas cambio unidades AC [Elaboración propia]...	96
Figura 33. Funcionamiento de la aerotermia [58]	103
Figura 34. AEO2023 Proyecciones del precio spot del gas natural [60].....	109
Figura 35. Funcionamiento de una pila de ión de litio [63]	114
Figura 36. Evolución horaria del precio de la electricidad [64]	116
Figura 37. Distribución energía horaria por tecnologías en día de verano [65]	116
Figura 38. Distribución energía horaria por tecnologías en día de invierno [65].....	117
Figura 39. Matriz comparativa impacto de medidas analizadas [Elaboración propia]	132

Índice de tablas

Tabla 1. Desglose consumos eléctricos en la vivienda [Elaboración propia]	33
Tabla 2. Desglose factura estándar electricidad [Elaboración propia]	41
Tabla 3. Desglose factura estándar gas [Elaboración propia]	47
Tabla 4. Características nuevas ventanas [Elaboración propia]	56
Tabla 5. Ventanas previas a la intervención	58
Tabla 6. Ventanas posteriores a la intervención	58
Tabla 7. Evolución de los consumos pre-intervención vs post-intervención [Elaboración propia].....	61
Tabla 8. Análisis temperatura media mensual estación Madrid Retiro a lo largo de los periodos analizado [33] [elaboración propia]	62
Tabla 9. Modelo económico intervención cambio de ventanas [Elaboración propia]	67
Tabla 10. Determinación de la potencia contratada óptima [Elaboración propia]	73
Tabla 11. Desglose CAPEX propuesta instalación FV [Elaboración propia]	84
Tabla 12. Modelo económico base de la propuesta de instalación FV [Elaboración propia]	86
Tabla 13. Análisis de sensibilidad instalación FV [Elaboración propia]	88
Tabla 14. Modelo económico base de la sustitución de unidades exteriores AC [Elaboración propia].....	95
Tabla 15. Matriz de sensibilidad sustitución unidades AC [Elaboración propia]	96
Tabla 16. Modelo económico base del mantenimiento del AC [Elaboración propia]	99
Tabla 17. Matriz de sensibilidad mantenimiento de unidades AC [Elaboración propia]..	100
Tabla 18. Modelo económico base de la aerotermia [Elaboración propia]	111
Tabla 19. Matriz de sensibilidad modelo económico aerotermia [Elaboración propia]....	112
Tabla 20. Análisis horario % de generación fósil del mix según Mibel, muestra de 10 días representativos de 2024 [65] [Elaboración propia]	118
Tabla 21. Modelo económico base de la batería [Elaboración propia]	123
Tabla 22. Análisis de sensibilidad de la batería [Elaboración propia]	124
Tabla 23. Listado de consumos con su respectiva fase. [Elaboración propia]	126

Tabla 24. Tabla resumen conexión trifásica. [Elaboración propia].....	127
Tabla 25. Comparativa de las distintas medidas evaluadas [Elaboración propia].....	131

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto consistirá en la realización de una auditoría energética a una instalación residencial (vivienda plurifamiliar, piso) en el centro de Madrid. Esta se complementará con el análisis y evaluación de intervenciones que se le han realizado en el pasado (obras o decisiones energéticas) así como la propuesta de mejoras de cara a futuro, siempre combinando el punto de vista técnico con el económico.

La volatilidad reciente de los precios del gas y la electricidad, exacerbada por factores como la pandemia del COVID-19 o la guerra en Ucrania, ha generado situaciones extremas como la volatilidad anualizada de hasta un 171% en los precios del gas natural en febrero de 2022 según la EIA [1]. Esto ha afectado directamente a los precios de la luz, que en España se acentuó con variaciones de hasta 400% mes a mes en inicios de 2022, de acuerdo con los datos de Maygmó Energía [2]. La variación en el último lustro del precio del gas se puede ver ilustrada en la siguiente *Figura*:

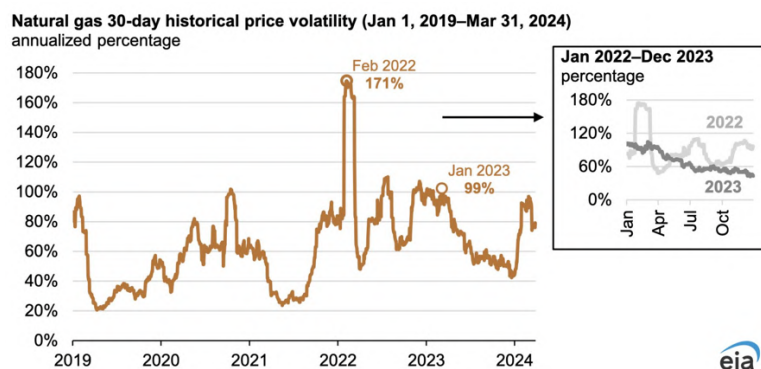


Figura 4. Volatilidad del precio del gas natural 2019-2024. [1]

Este fenómeno ha tenido un impacto directo en la pobreza energética, afectando a la calidad de vida y agravando la desigualdad en el acceso a servicios básicos como la calefacción y la electricidad en los hogares.

Por otro lado, los efectos adversos de la contaminación han provocado graves consecuencias para la salud pública. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que la contaminación del aire causa aproximadamente 6,7 millones de muertes prematuras al año [3], lo que pone de manifiesto la grave amenaza que representa para la salud global.

De este modo, este trabajo busca ser un ejemplo claro de cómo analizar y optimizar el consumo energético de un hogar. El principal objetivo es identificar y desarrollar mejoras que permitan a las personas contribuir al medioambiente mientras favorecen su economía personal. Esto, a su vez, impulsará su calidad de vida y reducirá la brecha energética en la sociedad, que hace referencia a la desigualdad en el acceso a energía asequible y eficiente.

En definitiva, el proyecto busca describir los distintos componentes relevantes que conforman el consumo del hogar y las diversas maneras de optimizarlo, siempre haciendo hincapié en la viabilidad de cada una de las medidas planteadas. Por ende, se trata de un trabajo fácilmente replicable en multitud de escenarios, dotándolo de gran alcance y por consecuencia un potencial gran impacto.

En este contexto, existen trabajos ya realizados con parecidos objetivos y situación inicial. Algunos ejemplos son el Trabajo de Fin de Máster de Luis Barandiarán [4], Íñigo Fernández Arregui [5] o Diego García Cuenca [6], en los que se proponen mejoras en el aislamiento, instalación de paneles fotovoltaicos, o la sustitución de una caldera de gas convencional por aerotermia. Estos proyectos arrojan resultados positivos en cuanto a la reducción del consumo, las emisiones, y el gasto. No obstante, este trabajo buscará aportar nuevo conocimiento mediante el análisis de intervenciones ya realizadas, llevando lo teórico a la práctica, así como mediante la inclusión de análisis de sensibilidad detallados que aporten más certeza y reduzcan la incertidumbre. El trabajo también incluirá un método para la optimización de la potencia contratada.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La razón principal de este proyecto es la necesidad de soluciones accesibles y efectivas en el ámbito energético. Frente al creciente calentamiento global y sus efectos negativos, no solo son necesarias las medidas a gran escala por parte de gobiernos y empresas, sino también acciones concretas que los individuos puedan implementar en sus hogares para generar un impacto positivo.

Este trabajo surge a partir de la falta de conocimiento que muchas personas sin formación técnica tienen al enfrentarse a sus facturas energéticas. Esto plantea una gran oportunidad para educar e incentivar a los ciudadanos a tomar medidas en sus hogares, contribuyendo así al cuidado del planeta mientras comprenden y reducen sus propios gastos energéticos, obteniendo beneficios tanto ambientales como económicos.

De este modo, el proyecto busca elaborar más en la problemática de encontrar las mejores prácticas para eficientar viviendas, tratando de proponer soluciones novedosas y analizando casos reales con los que probar y cuantificar lo teórico.

A nivel personal, este proyecto busca optimizar el consumo energético de mi vivienda familiar, teniendo impacto real en mi día a día y retribuyendo el apoyo de mis padres durante estos años. Además, evaluará la viabilidad de medidas aplicables a pisos en grandes ciudades como Madrid, cuyos patrones de consumo energético son similares a los aquí analizados y optimizados.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este proyecto de análisis y de innovación tiene varios objetivos interrelacionados:

1. **Determinar la eficiencia energética de la instalación:** mediante la auditoría energética inicial, este proyecto pretende desglosar el consumo y la eficiencia de la vivienda en cuestión para establecer el punto de partida y poder plantear soluciones adecuadas.

2. **Contribuir a la solución de los problemas medioambientales mediante la reducción de emisiones contaminantes:** ante la crisis climática y los efectos adversos de la contaminación, este proyecto busca formar parte de las soluciones propuestas por la comunidad científica, especialmente en el ámbito residencial. Se enfoca en aportar medidas concretas para reducir la huella de carbono y mejorar la sostenibilidad en el hogar.
3. **Identificar patrones de consumo energético de la instalación para determinar la potencia contratada adecuada:** ante los recientes problemas de suministro en la instalación, y los cambios en la potencia contratada, este proyecto busca entender el consumo de la vivienda y elaborar un método detallado que determine la potencia contratada óptima en una instalación.
4. **Proponer un plan de negocio realista y replicable:** además de eficientar la vivienda y contribuir a la problemática medioambiental, este proyecto busca presentar un modelo económico de cada propuesta descrita. Se pretende que este sea fácilmente replicable por otros usuarios y que, en la medida de lo posible, sea preciso mediante la inclusión de análisis de sensibilidad.

1.3 ALINEACIÓN CON OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Este proyecto está alineado con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En concreto, los más significativos y las respectivas contribuciones de este proyecto para cada uno de ellos son:

- **Objetivo 7 - Energía asequible y no contaminante:** el principal objetivo del proyecto planteado es mejorar la eficiencia energética de una vivienda, lo cual está muy ligado con hacer que la energía sea sostenible y con la reducción de la

contaminación. Adicionalmente, se estudiará la viabilidad de soluciones renovables en la instalación que mejoren la huella de carbono y la rentabilidad del consumo.

- **Objetivo 11 - Ciudades y comunidades sostenibles:** dado que la instalación energética de estudio es una vivienda en el centro de Madrid, se contribuye con el objetivo de reducir el impacto medioambiental de las ciudades y hacerlas más resilientes frente al cambio climático. Se pretende que esté proyecto sirva como referencia para muchos otros hogares semejantes en núcleos urbanos.
- **Objetivo 12 - Producción y consumo responsables:** en el proyecto se analizará en profundidad el consumo energético de la instalación, buscando tanto posibles ineficiencias como oportunidades de reducción de este, ayudando a la gestión sostenible de los recursos naturales.
- **Objetivo 13 - Acción por el clima:** la mejora en la eficiencia de la vivienda y la posible implementación de energía renovable supondrán una clara reducción en la huella de carbono de la vivienda y en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI o GHG) que contribuirán con el control y la ralentización del calentamiento global y todas sus consecuencias sobre el planeta.

1.4 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

La manera de proceder en la elaboración del proyecto consistirá en una primera parte de estudio de la cuestión (principalmente en materia de consumo en el hogar y eficiencia energética), seguida de un profundo análisis de la instalación y su consumo energético. Para ello se emplearán tanto fuentes externas (investigación) como datos históricos de la vivienda relacionados con los consumos. Se tratará de profundizar al máximo el estudio para sacar resultados de valor.

Tras ello se pasará a la evaluación de intervenciones pasadas y propuestas de futuro, contemplando tanto lo técnico como lo económico. Para esto se usará información detallada

de las intervenciones ya realizadas en el pasado, y una mezcla de conocimiento propio e investigación para las propuestas de mejora. Se terminará con conclusiones, aportaciones, lecciones aprendidas y pasos futuros.

De este modo, el cronograma planteado para cumplir las tareas aquí descritas, con las fases ya descritas, es el siguiente:

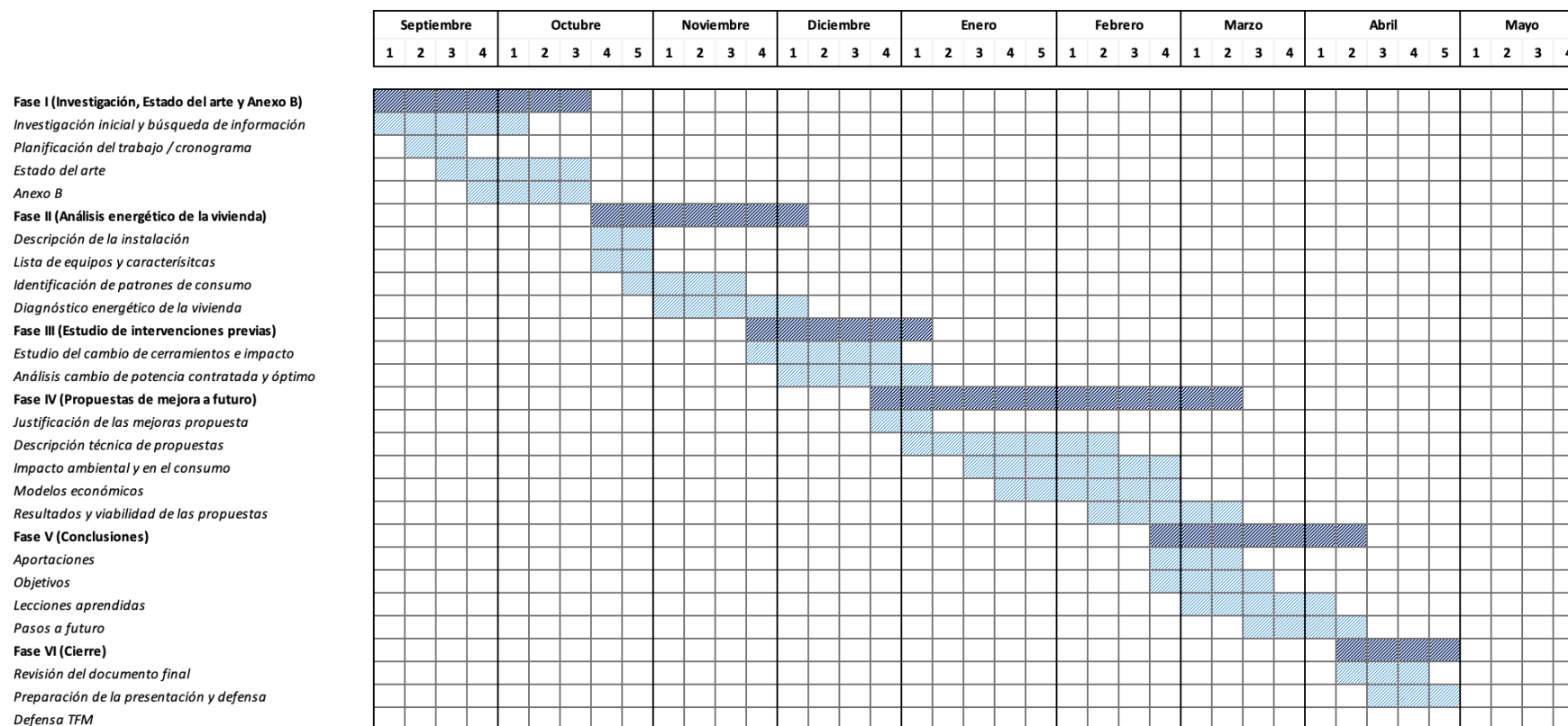


Figura 5. Cronograma completo del proyecto (Elaboración propia)

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Esta sección del trabajo tratará de arrojar luz sobre tendencias y factores clave en el ámbito del consumo de energía en el hogar y la eficiencia energética, introduciendo datos y explicando conceptos específicos que faciliten el seguimiento. Adicionalmente, se abordarán los problemas y retos que presenta el sector, así como las innovaciones recientes y las soluciones ya propuestas al problema planteado.

2.1. Evolución del consumo energético residencial

A la hora de entender los consumos energéticos del usuario final en el hogar, es importante clasificar los principales *players* que forman parte. Estos se pueden agrupar bajo las siguientes seis ramas: calefacción, refrigeración, agua caliente, electrodomésticos, iluminación y cocina.

Cada uno de ellos tiende a requerir de un tipo de energía específico (electricidad, gas natural o renovables, esencialmente), y tiene unas características y patrones diferentes. Por ejemplo, la refrigeración es exclusivamente consumo de electricidad (100% según un estudio de Eurostat [7]), mientras que la calefacción es mayoritariamente un mix de GN y renovables (36,3% y 31,4% según el mismo informe). Cabe mencionar que, a su vez, la electricidad puede provenir de fuentes renovables (solar fotovoltaica, eólica, etc.) o de combustibles fósiles (ciclo combinado, carbón, etc.); así como que el consumo de renovables en el hogar hace referencia principalmente a biomasa y solar térmica.

Detalladamente, en 2022 el consumo energético residencial en España se puede desglosar en: 73.463,6 GWh de electricidad, 145.075,0 TJ de gas, 2.317,4 kt de productos petrolíferos y 98.103,6 TJ de renovables y residuos; según el informe del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico correspondiente al año 2022 [8]. Este informe, que se publica con dos años de decalaje, proporciona una visión detallada de las fuentes de energía en el hogar.

Para facilitar la comparación homogénea de energía consumida de cada tipo sobre el total, se convierte todo a GWh: 73.463 GWh de electricidad (44%), 40.299 GWh de gas (24%), 26.951 GWh de productos petrolíferos (16%) y 27.251 GWh de renovables y residuos (16%). De esta forma, se observa que la electricidad representa casi la mitad del consumo energético residencial total en España, mientras que los combustibles fósiles (gas y productos petrolíferos) aún conforman alrededor del 40%. Hay que considerar que, mientras que la electricidad está presente en todos los hogares, el resto de los consumos no. Esto afecta notablemente a los valores agregados nacionales.

En cuanto a tendencias concretas, la electricidad juega un papel fundamental en la refrigeración, iluminación y electrodomésticos, con variaciones leves de año a año. En los años posteriores a la crisis económica de 2008, especialmente entre 2012 y 2015, se produjo una caída notable en el consumo de electricidad, como muestra el informe del MITECO [8]. A nivel medioambiental, la creciente demanda de electricidad se ha visto compensada en parte por el rápido aumento de la producción renovable en la última década. Según Red Eléctrica Española, más de la mitad de la electricidad generada en 2023 (50,3%) provino de fuentes renovables [9].

Por otro lado, el gas natural ha sido una de las principales fuentes para calefacción, junto con las energías renovables. Sin embargo, el uso de gas en este campo ha disminuido un 27% en los últimos 12 años, según el MITECO [8], lo que ha permitido que las renovables cobren mayor protagonismo.

En cuanto al consumo medio, los hogares en España consumen alrededor de 270 kWh mensuales de electricidad, lo que equivale a un consumo anual promedio de 3.272 kWh, según datos de REE [10]. Este consumo se distribuye principalmente entre electrodomésticos (66,8%), iluminación (11,7%), calefacción (7,4%) y refrigeración (7,5%). Los electrodomésticos que más contribuyen son la nevera (30%), la televisión (12,2%), la lavadora (11,8%) y el horno (8,3%).

El consumo energético de los electrodomésticos ha mejorado notablemente en las últimas décadas gracias a avances tecnológicos y regulaciones de eficiencia. En promedio,

la eficiencia energética global mejora alrededor de un 1-2% cada año, como señala la Agencia Internacional de la Energía (AIE) en su informe de 2023 [11], y estos progresos acumulados tienen un impacto significativo a largo plazo. A pesar de que el número de dispositivos por hogar ha aumentado, la adopción de tecnologías más eficientes ha permitido reducir la demanda energética total, contribuyendo al objetivo global de descarbonización y ahorro energético.

La siguiente gráfica de la AIE muestra la mejora anualizada en intensidad energética anualizada entre 2001 y 2023, y con los posibles escenarios Stated Policies Scenario (STEPS), Announced Pledges Scenario (APS) y Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) en los que se asume un mayor o menor grado de cumplimiento de objetivos climáticos. La variabilidad entre escenarios hace que las mejoras anualizadas estén entre el 1 y el 4%.

Annual primary energy intensity improvement, 2001-2023, and by scenario, 2022-2030

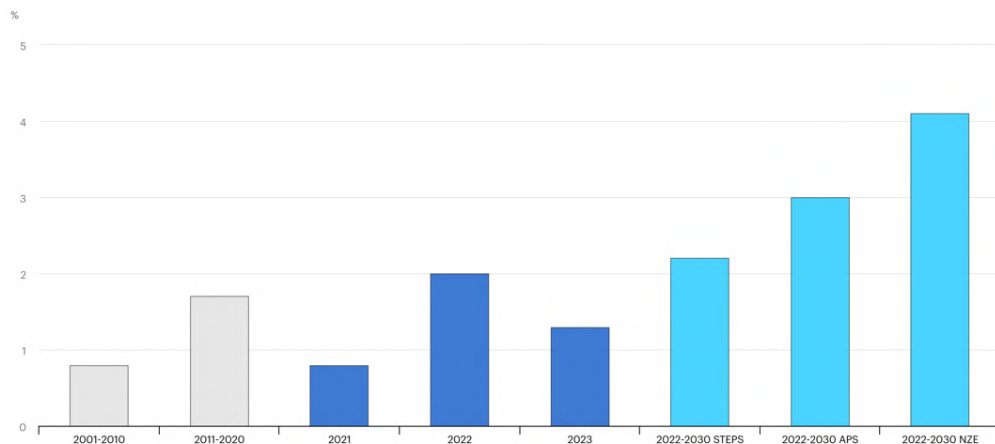


Figura 6. Mejoras porcentuales en reducción de la intensidad energética 2001-2030 [11]

Finalmente, para entender patrones de consumo energético es importante hablar del tipo de vivienda. Las viviendas unifamiliares, como los chalets aislados o adosados, tienen un consumo promedio anual de 15.513 kWh, casi el doble que el de las viviendas plurifamiliares (7.544 kWh), de acuerdo con el Ministerio de Consumo [12]. Estas

diferencias se deben a varios factores, incluyendo el tamaño de la vivienda, los sistemas de climatización utilizados y el aislamiento térmico.

2.2 Eficiencia energética

La eficiencia energética mide la capacidad de obtener el mayor *output* (salida) a través de la menor cantidad de *inputs* (entradas). Es decir, emplear la menor cantidad de energía posible para realizar una tarea o proporcionar un servicio, siempre garantizando la consecución de este. Llevado al hogar, la eficiencia energética es consumir la menor cantidad de energía para calentar/enfriar la casa a la temperatura deseada, o para realizar funciones cotidianas como poner una lavadora o mantener los alimentos a la temperatura deseada, entre otros.

Por lo tanto, al determinar la eficiencia entran en juego la eficiencia de cada uno de los equipos empleados (electrodomésticos, bombillas, calefacción, etc.) y las pérdidas energéticas del sistema. El primero hace referencia a las pérdidas intrínsecas del propio equipo, las cuales, en condiciones óptimas de funcionamiento, el usuario final no puede solventar. Si puede, sin embargo, escoger equipos eficientes con reducidas pérdidas. El segundo está ligado con la capacidad del sistema a contener la energía en el interior de la vivienda, mediante materiales aislantes en puertas, paredes y ventanas.

El concepto de eficiencia energética nace el 5 de marzo de 1998, en la Primera Conferencia Internacional de Eficiencia Energética celebrada en Austria. Aquí surge la propuesta de intentar reducir el consumo de fuentes de energía fósiles y tratar de poner soluciones a una posible crisis energética. Desde entonces, los objetivos han ido incrementándose, siendo para España actualmente el *target* para 2030 alcanzar una eficiencia de 32,5% a nivel nacional según la directiva 2018/2002, en paralelo a una penetración de renovables en la UE del 32% (directiva 2018/2001), ambas con revisiones al alza de acuerdo con el MITECO e IDAE [13].

En cuanto a la manera de certificar o acreditar la eficiencia energética, el Real Decreto 235/2013 obliga a realizar un procedimiento de certificación energética a los

edificios (viviendas de más de 50m²). Este busca poner a disposición de potenciales compradores o inquilinos información sobre el consumo y la eficiencia energética de la instalación. El proceso de certificación lo debe llevar a cabo un técnico homologado y en él se analizan factores como el aislamiento, el uso de renovables, la climatización o la iluminación. El certificado califica la eficiencia de la vivienda entre A (mejor) y G (peor), y se realizan una serie de recomendaciones de mejora. Estos certificados tienen una vigencia de 10 años y su no obtención puede acarrear multas. En ellos se tiene en cuenta tanto el consumo de la vivienda (kWh/m² año) como las emisiones (kgCO₂/m² año), tal y como se puede ver a continuación en el modelo aportado por REN30 [14]:

CERTIFICADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

IDENTIFICACIÓN DEL EDIFICIO O DE LA PARTE QUE SE CERTIFICA:

Nombre del edificio	Vivienda unifamiliar en Pobla Valbona		
Dirección	Calle Luis Pérez 5		
Municipio	La Pobla de Valbona	Código Postal	46058
Provincia	Valencia	Comunidad Autónoma	Valenciana
Zona climática	C3	Año construcción	2008
Normativa vigente (rehabilitación)	C.T.E.		
Referencia/s catastrales	EG78900234YJ0045G		

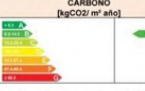
Tipo de edificio o parte del edificio que se certifica:

☐ Edificio de nueva construcción	☒ Edificio Existente
☒ Vivienda ☐ Unifamiliar ☐ Bloque ☐ Bloque completo ☐ Vivienda individual	☐ Terciario ☐ Edificio completo ☐ Local

DATOS DEL TÉCNICO CERTIFICADOR:

Nombre y Apellidos	Certificador	NIF (NIE)	2
Razón social	Certificador	NIF	2
Domicilio	Plaza Nueva 3		
Municipio	Valencia	Código Postal	46001
Provincia	Valencia	Comunidad Autónoma	Valenciana
e-mail:	certificador@certificador.es	Teléfono	0
Titulación habilitante según normativa vigente	Arquitecto		
Procedimiento reconocido de calificación energética utilizado y versión:	CEXv2.3		

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA OBTENIDA:

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m ² año]	EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO ₂ /m ² año]
	

El técnico abajo firmante declara responsablemente que ha realizado la certificación energética del edificio o de la parte que se certifica de acuerdo con el procedimiento establecido por la normativa vigente y que son ciertos los datos que figuran en el presente documento, y sus anexos.

Fecha: 30/09/2016

Firma del técnico certificador

Anexo I. Descripción de las características energéticas del edificio.
Anexo II. Calificación energética del edificio.
Anexo III. Recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética.
Anexo IV. Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico certificador.

Registro del Órgano Territorial Competente:

Fecha: 30/09/2016
Ref. Catastral: EG78900234YJ0045G

Página 1 de 6

Figura 7. Ejemplo de certificado de eficiencia energética [14]

A pesar de ser de obligado cumplimiento, estos certificados ofrecen múltiples beneficios. Por un lado, una buena calificación puede aumentar el valor del inmueble por el ahorro energético implícito, ya que una vivienda con calificación ‘A’ puede consumir hasta un 90% menos que una calificada como ‘G’, según analiza la empresa energética KM2 a través de un estudio de la OCU (Organización de Consumidores y Usuarios) [15]. Además,

la significativa reducción en las emisiones de CO₂ puede permitir acceder a ayudas y subvenciones o a financiamientos “verdes”. Por último, garantiza el cumplimiento de la normativa sin necesidad de realizar inversiones, ya que la Comisión Europea exigirá que todas las viviendas tengan una calificación mínima de ‘E’ en 2030 y ‘D’ en 2033, según el GBCE [16].

En resumen, la eficiencia energética no solo desempeña un papel crucial en la lucha contra el cambio climático, sino que también se puede traducir en beneficios económicos para los hogares. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) [17], se estima que para 2030 el consumo de energía final se reduzca en un 19% respecto a 2022, y el de energía primaria en un 21,1%; lo que evidencia una mejora de la eficiencia energética de los equipos, de los procesos de transformación de energía, y de las políticas de sostenibilidad. Esta evolución se puede ver en la siguiente *Figura*:

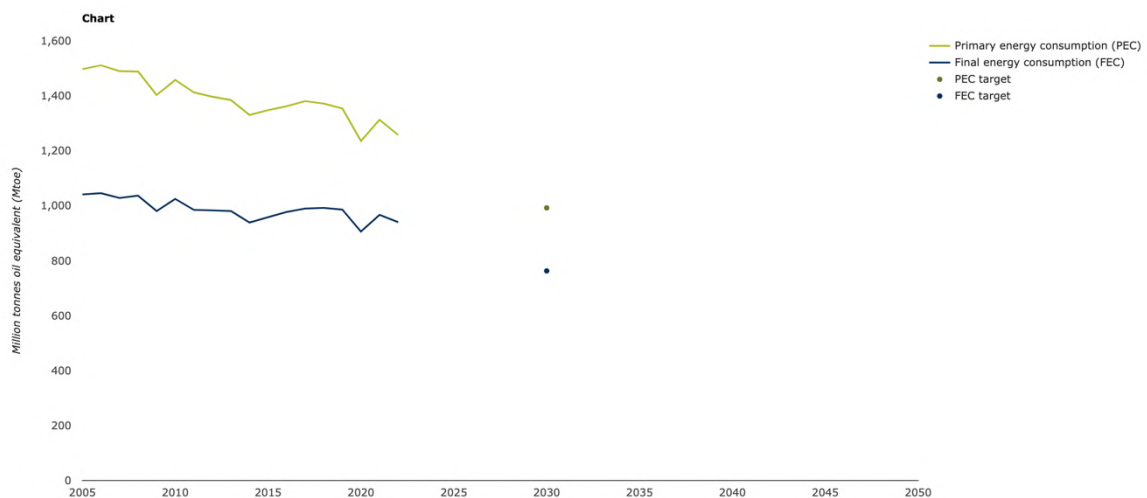


Figura 8. Evolución del consumo de energía primaria y final en la UE (2005-2022 y objetivo 2030) [17]

Esto representa una reducción significativa de las emisiones de CO₂ y un ahorro sustancial en las facturas energéticas. Para ello, las políticas y tecnologías enfocadas en la mejora de la eficiencia energética son fundamentales para lograr los objetivos de sostenibilidad y descarbonización a largo plazo.

2.3 Retos

Antes de entrar en profundidad en el análisis de una instalación energética particular, es importante entender los principales retos a los que se enfrenta el sector del consumo energético residencial. Estos son diversos y amplios, pero se ha optado por centralizar en: la volatilidad de los precios y dependencia en el suministro, la pobreza energética, y los efectos medioambientales.

2.3.1. Volatilidad de los precios y dependencia en el suministro

En primer lugar, la volatilidad de los precios y la dependencia en el suministro energético han sido una constante en los últimos años, exacerbada por eventos globales. Por ejemplo, durante la pandemia de Covid-19 en 2020, los precios de la electricidad fluctuaron significativamente, desde los 52,4€/MWh al inicio del año, hasta mínimos de 22,5€/MWh en mayo, y cerrando el año en 83,7€/MWh, según datos de Maygmó Energía [2]. La situación empeoró en 2022 debido a la guerra de Ucrania, cuando los precios de la electricidad alcanzaron máximos históricos de 544,98€/MWh en marzo. El precio del gas siguió una tendencia similar, con un incremento de alrededor del 48% en el mercado regulado en el mismo periodo, y con volatilidad anualizada de hasta 171% según la EIA [1].

Las variaciones en los precios se deben en gran parte a la dependencia energética de terceros, como la influencia del gas ruso en Europa, que afectó a los precios de la electricidad. Este fenómeno aumenta el riesgo de fluctuaciones y obliga a considerar múltiples escenarios antes de abordar proyectos energéticos. La independencia energética mediante fuentes renovables es clave para reducir riesgos geopolíticos, estabilizar precios y evitar crisis futuras. Además, integrar energías limpias como solar, eólica o biometano disminuiría la dependencia de importaciones y reduciría las emisiones, mejorando la estabilidad del sistema.

2.3.2. Pobreza energética

Otro reto clave es la pobreza energética, que afecta a un 17,6% de la población en España en 2024, según el XV Informe sobre el Estado de la Pobreza de la Red de Lucha contra la Pobreza y la Exclusión Social elaborado por EAPN-ES [18]. Este porcentaje ha aumentado un 196,3% desde 2008, y es notablemente superior a la media europea (10,6%), según afirma EAPN con datos de Eurostat.

La pobreza energética se define como la incapacidad de mantener un suministro energético adecuado en el hogar, o cuando una parte excesiva de los ingresos debe destinarse a pagar la factura energética. Este problema es especialmente preocupante en un país con un clima moderado, lo que subraya la necesidad de medidas que mejoren la eficiencia energética y alivien la presión económica sobre los hogares vulnerables.

2.3.3. Emisiones contaminantes

Por último, los efectos medioambientales derivados del consumo energético también constituyen un desafío significativo. La energía es responsable de aproximadamente el 77% de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa, según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) [19], y, las ciudades en particular, consumen el 78% de la energía mundial mientras generan el 60% de las emisiones, según Naciones Unidas [20]. Esta realidad agrava problemas de salud pública, afecta a los ecosistemas y contribuye al cambio climático.

La transición hacia energías más limpias y la descarbonización del sector energético son esenciales para mitigar estos efectos. Un ejemplo de ello es el objetivo de la Unión Europea de eliminar el uso de calefacción a gas para 2040 [21]. No obstante, aproximadamente dos tercios de los sistemas de calefacción actuales utilizan gas, lo que requiere una inversión significativa en tecnologías más limpias, como aerotermia, calderas híbridas, o el uso de biometano e hidrógeno verde.

2.4 Innovación

En cuanto a la innovación en el campo del consumo energético en el hogar, destacan proyectos que buscan optimizar la eficiencia energética, reducir el impacto medioambiental, y mejorar el confort o la calidad de vida de los usuarios.

En el creciente ámbito de la inteligencia artificial, las *smart homes* buscan una interconexión total entre los equipos del hogar, obteniendo un mayor control que permita mejorar la experiencia del particular y la optimización energética. Un ejemplo de ello son los electrodomésticos Bespoke AI de Samsung, entre los que en 2024 destacan: el refrigerador Bespoke AI Family Hub, la lavadora y secadora Bespoke AI Smart Tower y la aspiradora JetBot AI+. El centro de lavado, entre otras cosas, recomienda y optimiza los ciclos de lavado en función de la tela, la suciedad y el volumen de prendas que se hayan introducido, según el propio Samsung [22].

En cuanto a equipos de calefacción, los cuales son los grandes consumidores en el hogar, existen diversos proyectos que plantean desde sustituir la caldera hasta realizar una simple modificación. Una opción es sustituir la caldera de gas e instalar una bomba de calor aerotermia. Este equipo emplea un compresor y calor del ambiente para subir o bajar la temperatura y calentar el ACS (agua caliente sanitaria) de manera limpia.

Sin embargo, a pesar de contribuir con el medioambiente y reducir la factura energética, esta opción requiere alta inversión (CAPEX) y no es tan rentable para viviendas pequeñas de bajo consumo. Por ello, una opción son las calderas híbridas. Consisten en añadirle a la caldera de gas una bomba de calor para contribuir parcialmente con la demanda energética y reducir la factura, pero con una menor inversión inicial necesaria.

Otra opción en este contexto son las calderas 100% hidrógeno renovable como las del proyecto H100 Fife en Escocia, con el que pretenden evitar la emisión de 2.208kg de CO₂ por hogar al año [23]. Esta opción, además de anular el impacto medioambiental, es de interés puesto que el hidrógeno (H₂) es el elemento más abundante del Universo. No obstante, esto requiere una mayor inversión en la infraestructura del hidrógeno para consolidarlo como vector energético.

En lo referente al consumo de electricidad, aparte del aumento en la generación renovable por parte de los principales productores, el principal actor en el autoconsumo renovable es la solar fotovoltaica. En los últimos años, los fabricantes han aumentado la capacidad instalada, con un crecimiento de más de 2.5 GW en 2022 solo en España [24]. Además, esto viene acompañado de una mejora en los sistemas de almacenamiento, lo que refuerza su adopción en el ámbito residencial e industrial. La evolución de la potencia instalada de solar FV de autoconsumo se puede ver en la siguiente gráfica de la Unión Española Fotovoltaica (UNEF):



Figura 9. Evolución de la potencia instalada de solar FV autoconsumo en España [24]

Esta consolidación se ve respaldada por la reducción de más del 80% en los costes de instalación de solar fotovoltaica entre 2010 y 2020, según la Agencial Internacional de Energías Renovables (IRENA) [25]. Esto ha reducido considerablemente su Levelized Cost of Electricity (LCOE) y la ha convertido en una inversión con alta rentabilidad en poco tiempo. Por ello, la fotovoltaica se está posicionando como la tecnología dominante en el autoconsumo energético en España, tanto en el sector residencial como en el industrial.

Por último, otra alternativa innovadora es la de las micro centrales hidroeléctricas. La *start-up* francesa Zecub ha desarrollado un modelo de central hidroeléctrica de pequeña escala que aprovechando el agua del grifo es capaz de generar entre 5 y 7 kWh al día [26]. Considerando el consumo mensual medio de 270 kWh por hogar, esto podría conllevar un

ahorro mensual de hasta el 70% de la factura. Sin embargo, este enfoque plantea un desafío significativo: la reducción de la presión del agua en la red de suministro.

Si se extrae agua para generar energía, se reduce la presión de esta, y por ende afecta a la calidad del uso final del agua, especialmente en zonas con presión ya baja. Restaurar la presión mediante bombeo adicional podría aumentar los costos operativos, contrarrestando los beneficios económicos esperados. Aunque podrían existir usos alternativos para el agua extraída, como en riego o procesos industriales, la viabilidad de este sistema dependerá de una gestión eficaz del flujo y la presión del agua.

2.5 Lecciones aprendidas de proyectos similares

Habiendo analizado las tendencias y los principales retos energéticos, es importante examinar soluciones aplicadas a casos específicos y los resultados obtenidos. Esto permite identificar qué estrategias han sido exitosas y cuáles no han alcanzado los objetivos propuestos.

Una de las soluciones más comunes es la mejora del aislamiento, especialmente mediante el cambio de ventanas. En varios Trabajos de Fin de Máster o Grado, como los de Luis Barandiarán Iturmendi [4], Íñigo Fernández Arregui [5], y Diego García Cuenca [6], se han estudiado los impactos de estas mejoras. Barandiarán estima que el cambio de ventanas puede reducir el consumo y las emisiones hasta en un 75%, con una TIR del 10%, siendo esta la medida con mayor impacto y menor incertidumbre. En contraste, Fernández Arregui argumenta que no es necesaria la inversión en aislamiento en su caso, debido a la existencia de valores ya aceptables. García Cuenca, aunque no recomienda el triple acristalamiento por no considerarlo rentable al disponer la instalación ya de doble, sí valora positivamente la mejora del aislamiento en general.

Respecto a los sistemas de calefacción, la aerotermia ha sido planteada como una alternativa viable a las calderas convencionales. L. Barandiarán [4] considera esta medida como incierta, debido a la fluctuación de los precios de la electricidad, sugiriendo que solo es efectiva tras optimizar el aislamiento. I. Fernández Arregui [5] propone un sistema de

aerothermia de 18kW, logrando un ahorro anual del 50%, mientras que D. García Cuenca [6] evalúa otras opciones, como calderas de condensación o biomasa, siendo esta última menos rentable al aplicar una demanda energética reducida en torno al 70% tras mejorar el aislamiento.

En cuanto a la generación limpia, la instalación de paneles solares fotovoltaicos se presenta como una solución con poca incertidumbre y alta viabilidad económica. L. Barandiarán [4] proyecta una reducción del consumo de hasta un 74% y una TIR del 5% al implementar esta medida.

Finalmente, estos proyectos también revisan la eficiencia de los equipos eléctricos. El cambio a electrodomésticos de menor consumo y la adopción de iluminación LED son mejoras comunes y efectivas. No obstante, es crucial asegurar que el rendimiento de los nuevos equipos sea igual o superior al anterior para evitar comprometer la funcionalidad.

En este proyecto se podrá profundizar en los análisis ya expuestos mediante la evaluación de un caso real: el cambio de ventanas de madera sin aislamiento a doble acristalamiento con tecnología Climalit. Además, se caracterizará energéticamente la vivienda a fin de encontrar oportunidades de mejora, planteando soluciones específicas a futuro para cada problema y contrastando resultados.

Capítulo 3. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA

En esta sección se analizará detalladamente el consumo de la instalación en cuestión, obteniendo información relevante en cuanto al consumo de electricidad y gas. Para ello, se partirá de una descripción de la instalación, con el fin de contextualizar todo lo descrito y evaluado en el proyecto, así como para identificar instalaciones similares a las que se pueda extrapolar lo aquí hallado.

Tras ello se desglosará el listado de equipos presentes en la instalación, con sus características fundamentales, y en último lugar se realizará al estudio del consumo (tanto de electricidad como de gas) y la caracterización de la eficiencia energética.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La instalación es un piso ubicado en el Distrito Centro de la ciudad de Madrid, en la calle Conde de Xiquena con código postal 28004. El piso es una vivienda individual parte de una vivienda plurifamiliar (bloque), que cuenta con cinco plantas y dos viviendas por planta. El año de construcción del edificio es el año 1920, considerándose un edificio antiguo. La zona climática, al estar la vivienda situada en Madrid ciudad, es D3. La referencia catastral es 1151506VK4715A0007DI.

La vivienda tiene una superficie construida de 290m² y habitable de 230m², y cuenta con tres habitaciones y cuatro baños (uno de ellos a modo de aseo de invitados). Además, cuenta con una cocina con dos neveras, lavadora-secadora, placa de inducción, y lavavajillas como principales consumidores; un hall de entrada y un salón-comedor. A continuación, se puede visualizar un plano de la planta de la vivienda:

3.2 LISTADO DE EQUIPOS

Dado que los equipos (iluminación, electrodomésticos, calefacción y refrigeración, etc.) dan forma al consumo, se considera esencial identificarlos y caracterizarlos con precisión. Se ha decidido segmentarlos en función de su naturaleza.

3.2.1 EQUIPOS DE ILUMINACIÓN

Estos equipos se caracterizan por el consumo exclusivo de electricidad y son esencialmente lámparas de mesa, lámparas de techo, lámparas de pie y focos empotrados.

- **Lámparas de mesa:** la vivienda cuenta con 7 lámparas de mesa con los siguientes consumos:
 1. Flexo LED de potencia 5W
 2. Bombilla Philips Dimmable de 8W
 3. Bombilla de 100W
 4. Bombilla de 5W
 5. 2x bombilla LED OSRAM de 4W
 6. Bombilla de 40W
- **Lámparas de techo:** la vivienda cuenta con un total de 10 lámparas de techo, con los siguientes consumos:
 1. 2x bombilla OSRAM LED E27 con un consumo de 11W cada una
 2. 3x bombilla OSRAM LED E27 con un consumo de 12W cada una
 3. 5x bombilla IMPACT LED de consumo 60W cada una
 4. 2x barra fluorescente Radium Bonalux con un consumo de 28W cada una
- **Lámparas de pie:** la vivienda cuenta con 4 lámparas de pie con los siguientes consumos:
 1. Bombilla LED OSRAM de consumo 4W
 2. Bombilla OSRAM LED E27 con un consumo de 7,5W
 3. Bombilla OSRAM LED E27 con un consumo de 11W
 4. 2x Bombilla LED ledvance con consumo de 5,8W cada una

- **Focos empotrados:** la vivienda cuenta con un total de 67 focos empotrados, los cuales son módulos Spotlight SLA AC pc G2 50mm 700lm 930 36 NDC, cada una con una potencia de 9,5W, vida útil de hasta 50.000 horas y clase G de eficiencia energética.

Además, la vivienda cuenta con barras LED en la cocina (~ 6 metros de LEDs) y en el vestidor de la habitación principal (~ 12 metros de LEDs). Considerando un consumo lineal estimado de 14,4 ~ 15 W/m según EnergyGo [27], estas añadirían un total de 270 W.

Por lo tanto, la vivienda cuenta con **1.520,6W** instalados de **iluminación** (potencia eléctrica) principalmente LED y 2 barras fluorescentes.

3.2.2 ELECTRODOMÉSTICOS

Los electrodomésticos son aparatos mecánicos, eléctricos o electrónicos diseñados para cumplir con funciones del hogar. Sus principales tareas son ayudar a cocinar, limpiar, y lavar. Además, al igual que los equipos de iluminación, los electrodomésticos consumen únicamente electricidad. Los principales consumos de la instalación correspondientes a esta sección son:

- **Nevera:** modelo 3FA4664X del fabricante Balay. Consumo energético de 432 kWh/annum y clase A+ de eficiencia energética. Aunque la ficha técnica no muestra la potencia, 432kWh/annum equivalen a un consumo constante de 49W, que usando los datos de la nevera 2 y con un ratio $P_{\text{pico}} / P_{\text{media}}$ menor por una mayor eficiencia y uso constante en una nevera convencional, se puede aproximar a un consumo pico de 150W.
- **Nevera 2:** modelo vinamour 19 Uno 10033127 del fabricante Klarstein. 220-240V con una potencia de 85W. Consumo energético anual de 135 kWh/annum y clase G de eficiencia energética. Ratio $P_{\text{pico}} / P_{\text{media}} = 5,5$ (empleado para el cálculo de la potencia pico de la nevera 1).
- **Lavadora-secadora:** modelo 3TW776B del fabricante Balay. 220-240V de tensión de alimentación, 2.300W de potencia de conexión y clase B de eficiencia energética.

- **Lavavajillas:** modelo 3VF301NP del fabricante Balay. Tensión de alimentación 220-240V con potencia de conexión 2.400W. Clase F de eficiencia energética.
- **Horno:** modelo 3HB506XM del fabricante Balay. Tensión de alimentación 220-240V con corriente de 16A, potencia de conexión de 3.580W. Con Clase A de eficiencia energética y consumo estimado por ciclo 0,84-0,90 kWh/ciclo.
- **Placa de cocción:** modelo 3EB8.5.R del fabricante Balay. Tensión de alimentación 220-240V. Potencia de los tres elementos calefactores: 1 x 1.4 (2.2) kW, 1 x 2.2 (3.7) kW, 1 x 2.6 (3.7) kW, en función del nivel de potencia deseado, siendo por ende la potencia máxima de salida de $2,2+3,7+3,7 = 9,6\text{kW}$. Potencia de alimentación 4600W. Habrá que tener en cuenta posteriormente que en la instalación nunca se usan los 3 fuegos simultáneamente a máxima potencia, lo que reducirá la potencia demandada.
- **Microondas:** modelo 3WMX1918 del fabricante Balay. Potencia de conexión 1.270W con cinco niveles de potencia (90, 180, 360, 600 y 800) a 230V.
- **Batidora:** modelo 4655 con vaso de vidrio del fabricante Oster. Potencia de 600W.
- **Cafetera:** modelo CitiZ de la marca Nespresso by Krups. Potencia de 1.260W.
- **Plancha de vapor:** modelo Focus Excel del fabricante Rowenta. Potencia de 2.700W.
- **Campana extractora:** modelo FSTP 90 5 N X del fabricante Franke. Tensión de 220-240V con potencia de hasta 160W. Clase C de eficiencia energética con un consumo de 82 kWh/annum.
- **Aspiradora:** modelo Vaccum Cleaner G11 del fabricante Xiaomi. Potencia de 500W.
- **Tostadora:** modelo LS342D10 del fabricante Moulinex. Potencia de 1700W.
- **Televisores:** la instalación cuenta con 3 televisores, situado uno de ellos en el salón y los otros dos en habitaciones. En concreto, una Bang & Olufsen beovision eclipse 55" con consumo medio de 130W y máximo de 200W, una Sony KDL 42W650A de 42" con consumo 95W clase A+, y una Sony KDL-40HX750 de 40" con consumo 119W clase A.

- **Otros:** en este grupo se consideran los ordenadores, tablets, teléfonos u otros dispositivos. Se cuenta con 4 iPhones con cargadores de 20W cada uno. También de 1 ordenador PC HP OMEN 30L GT13-0017ns (750W de consumo, eficiencia platino), 1 MacBook (61W), y 2 iPads (20 W cada uno).

En definitiva, los electrodomésticos y otros dispositivos suman una **potencia eléctrica instalada** (pico) de **22.650W** o **22,65kW**.

3.2.3 CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN

Por último, el tercer grupo a considerar es el de los equipos de climatización. Para la calefacción se dispone de 13 radiadores y 3 radiadores-toallero, todos de agua y de aluminio de los fabricantes Baxi Dubal y Orkli, los cuales transmiten el calor aportado por la caldera al hogar. Concretamente, están alimentados por una caldera de gas natural del fabricante francés Saunier Duval, modelo Isofast Condens 35-A (H-ES), que se encarga de la calefacción del hogar y ACS (agua caliente sanitaria). La caldera se conecta a la red de 230V con una intensidad nominal de 0,49A, resultando en un consumo de **113VA**. Si consideramos un factor de potencia razonable ($\cos\varphi = 0,9$), que relaciona la potencia aparente (activa + reactiva) con la potencia activa:

$$P_{in,caldera} = S_{in,caldera} \cdot \cos\varphi = \mathbf{101,7\ W}$$

El equipo cuenta con 35kW de potencia de salida, con potencia útil de 30-32,8kW para calefacción y 35,7kW para ACS. Además, posee clase A de eficiencia energética. Cabe recordar que este equipo consume principalmente gas, por lo que su consumo es diferente al del resto de electrodomésticos y equipos de iluminación analizados en este capítulo.

Por otro lado, la refrigeración, que sí consume energía eléctrica, se transmite mediante conductos instalados en la parte superior de la vivienda (por el techo). Los equipos refrigeradores son dos unidades exteriores (bombas de calor) del fabricante Mitsubishi Electric Corporation, modelos PUHZ-RP5VHA y PUHZ-RP6VHA, con potencias de refrigeración de 12,5 y 14 kW respectivamente, así como calefacción de 14 y 16 kW. La alimentación se realiza a 220-240V y 15,8/17,5A en el primero, y 20,73/20,37A en el

segundo, con corrientes máximas de 28 y 29,5A respectivamente. La primera de las corrientes nominales es la de refrigeración, siendo la segunda la de calefacción. Dado que estos equipos solo se usan para refrigerar, las potencias aparentes monofásicas (una única fase) consumidas se pueden calcular como:

$$S_{\text{consumo1}} = S_{\text{input1}} = V_{\text{red}} \cdot I_{\text{nominal1}} = 230\text{V} \cdot 15,8\text{A} = 3.634 \text{ VA}$$

$$S_{\text{consumo2}} = S_{\text{input2}} = V_{\text{red}} \cdot I_{\text{nominal2}} = 230\text{V} \cdot 20,73\text{A} = 4.768 \text{ VA}$$

Por lo tanto, los equipos de refrigeración suman un total de 8.401,9 VA de potencia eléctrica instalada, de los que se extraen 26,5 kW de potencia de refrigeración de salida mediante un ciclo termodinámico de bomba de calor que se explicará en detalle más adelante en este documento. Considerando un factor de potencia razonable ($\cos\varphi = 0,9$):

$$P_{\text{AC}} = S_{\text{AC}} \cdot \cos\varphi = \mathbf{7.561,7 \text{ W}}$$

La eficiencia de las bombas de calor se mide a través del COP (Coefficient of Performance) en calefacción y EER (Energy Efficiency Ratio) en refrigeración. Estos miden la potencia térmica de salida de la bomba (kW) entre la potencia eléctrica de entrada (kW). Para el caso de las unidades AC, estas tienen un EER de 3,8 y 3,4. Cabe mencionar que ambos compresores fueron fabricados a finales de 2004, lo que a priori podría ser una posible señal de una menor eficiencia energética que conlleve un mayor consumo.

En conjunto, la climatización de la vivienda cuenta con alrededor de 7,66 kW de potencia eléctrica instalada, de los cuales 7,56 kW corresponden a refrigeración.

En definitiva, considerando todos los consumos, la vivienda cuenta con alrededor de **31,8 kW de potencia eléctrica instalada total** (iluminación + electrodomésticos y otros dispositivos + climatización), desglosados de manera más aclarativa en la siguiente tabla:

Naturaleza del consumo	Elemento	Modelo y fabricante	Consumo de potencia eléctrica (W)
Iluminación	Bombillas LED	OSRAM, Impact o Philips	1464,6
	Barras fluorescentes	Radium Bonalux	56
Electrodomésticos	Nevera 1	3FA4664X Balay	150
	Nevera 2	Vinamour 19 Uno 10033127 Klarstein	85
	Lavadora-secadora	3TW776B Balay	2300
	Lavavajillas	3VF301NP Balay	2400
	Horno	3HB506XM Balay	3580
	Placa de cocción	3EB8.5.R Balay	4600
	Microondas	3WMX1918 Balay	1270
	Batidora	4655 Oster	600
	Cafetetera	CitiZ Krups	1260
	Plancha de vapor	Focus Excel Rowenta	2700
	Campana extractora	FSTP 90 5 NX Franke	160
	Aspiradora	G11 Xiaomi	500
	Tostadora	LS342D10 Moulinex	1700
	Televisores	2xSony + 1xBang&Olufsen	414
	Otros electrónicos	Móviles, tablets y ordenadores	931
Climatización	Caldera calefacción	Isofast Condens 35-A Saunier Duval	101,7
	Unidades AC	PUHZ-RP5VHA y PUHZ-RP6VHA de Mitsubishi	7561,7
Potencia eléctrica instalada (W):			31834

Tabla 1. Desglose consumos eléctricos en la vivienda [Elaboración propia]

La potencia instalada es la capacidad máxima de los equipos que conforman la instalación, o lo que es lo mismo, la suma de la potencia de todos los consumos. No obstante,

es importante entender que esta no coincide con la potencia que se consume en un instante determinado, puesto que no todos los consumos se emplean simultáneamente.

Debido a este fenómeno nace el concepto de coeficiente de simultaneidad (K_s o C_s), el cual pondera que no todos los dispositivos se conectan simultáneamente, y el coeficiente de utilización (K_u), el cual tiene en cuenta la utilización real de cada consumo (no todos se usan lo mismo ni siempre están en uso o consumiendo el 100% de su potencia de alimentación). Con estos se obtiene el valor necesario para abastecer el consumo habitual de la instalación y se determina la potencia contratada, que es la máxima que el proveedor nos abastece. Este análisis se realizará más adelante en el *Capítulo 4.2: Aumento de la potencia eléctrica* contratada, teniendo en cuenta también el REBT (Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión).

3.3 ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Esta sección analizará el consumo eléctrico y de gas de la instalación, encontrando patrones que ayuden a entender el comportamiento de la vivienda para proceder a su optimización. Como se introdujo previamente, los proveedores de la instalación son Iberdrola para el consumo eléctrico y su filial CUREnergía (Comercializador de Último Recurso) para el consumo de gas natural.

Hasta diciembre de 2022 Iberdrola suministraba tanto la electricidad como el gas. Por la escalada del precio del gas debida a conflictos geopolíticos ya analizados, en enero de 2023 se cambió a CUREnergía, siendo esta su filial en el mercado regulado que garantiza una menor volatilidad de precios.

3.3.1 CONSUMO DE ELECTRICIDAD

Para el consumo de electricidad se han considerado los datos proporcionados por el suministrador (Iberdrola) de los últimos 3 años. Los periodos mensuales de facturación son de 30 días desde el inicio del contrato, que se inició a mediados de mes. Por lo tanto, la factura del mes “i” corresponde a la segunda mitad del mes anterior y la primera mitad del

mes de facturación. En la siguiente gráfica puede apreciarse la evolución en el consumo durante dicho periodo:

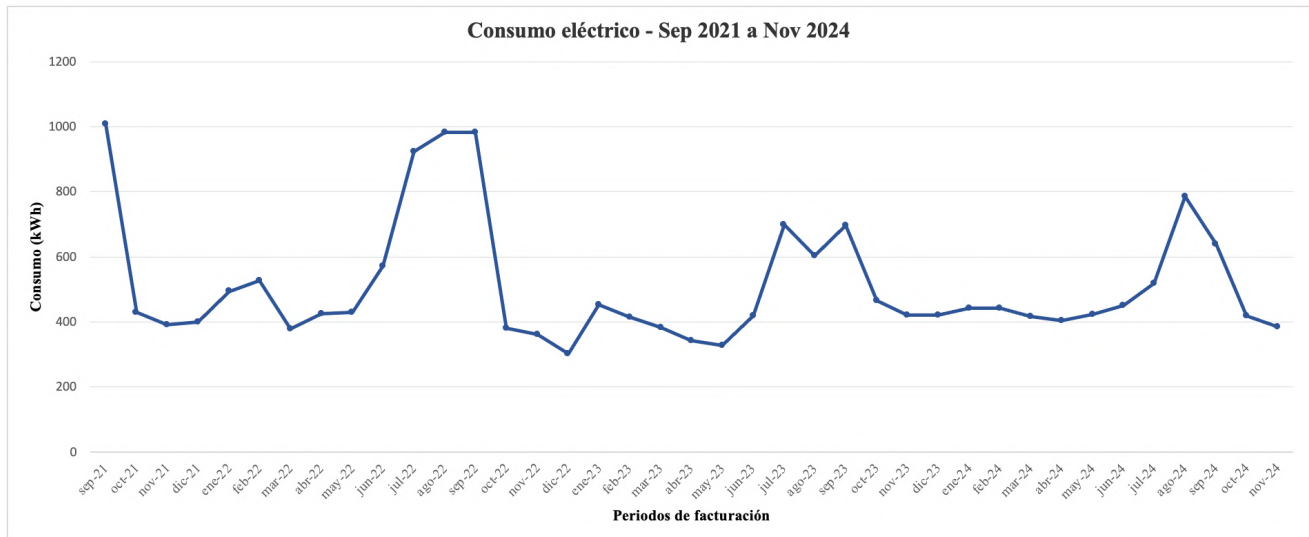


Figura 11. Consumo mensual de electricidad septiembre 21 a octubre 24 [Elaboración propia]

Las primeras observaciones de valor en este análisis inicial son:

1. El consumo mensual “estándar” ronda los 400kWh, lo que equivale a unos 13 kWh/día. Este se da en los meses de no verano, que van de octubre a mayo ambos inclusive.
2. Los meses de verano (junio a septiembre, pero especialmente julio y agosto) son los de mayor demanda, con un consumo de entre 700 y 1.000 kWh. Esto se debe al uso de aire acondicionado en los meses de temperatura más elevada. Está en consonancia con lo comentado en el Estado del Arte, dónde se adelantaba que el consumo de electricidad se ve fuertemente condicionado por el aire acondicionado.
3. Existe una reducción del consumo en los periodos previos al cambio de ventanas (último cuatrimestre de 2022) respecto a los de después. En concreto, los meses de verano pasan de un consumo de 1.000 kWh/mes a un consumo de 700-800 kWh/mes. Esto se analizará detalladamente en el apartado de estudio de intervenciones previas.

En la siguiente *Figura* se pueden ver los tres hallazgos comentados señalados en la gráfica del consumo:

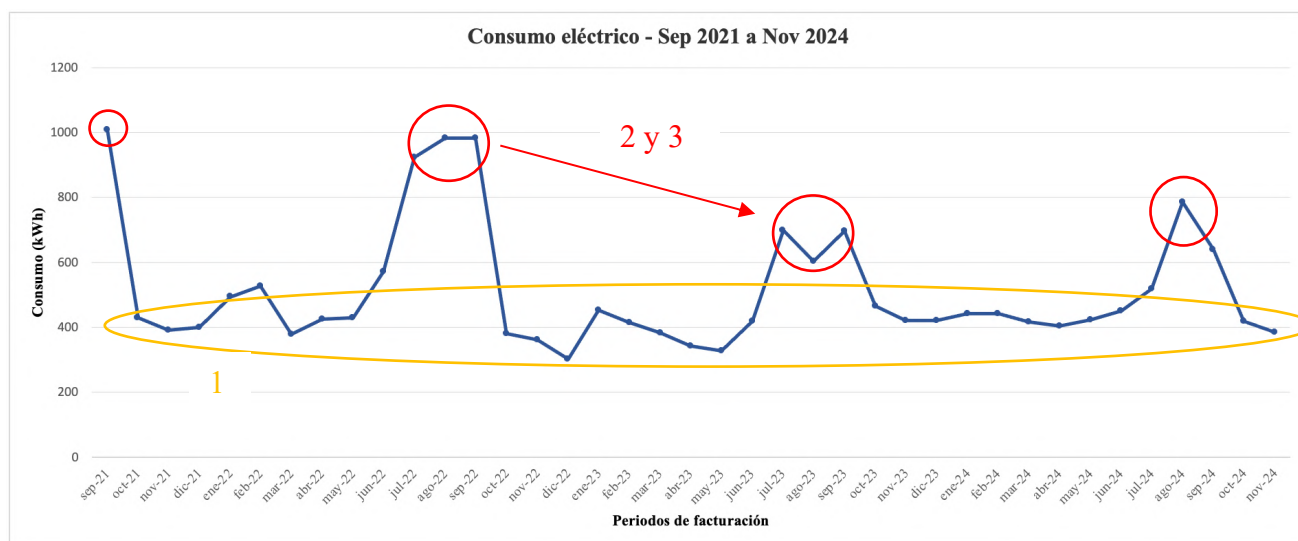


Figura 12. Análisis patrones de consumo de la instalación [Elaboración propia]

A continuación, el siguiente paso ha sido analizar el consumo diario a lo largo de tres meses diferentes (estándar y verano) por si hubiera algún patrón significativo como días laborales vs fin de semana. Se han seleccionado enero 2024 (mes estándar), julio 2024 (mes de verano) y agosto 2024 (mes de verano con vacaciones):

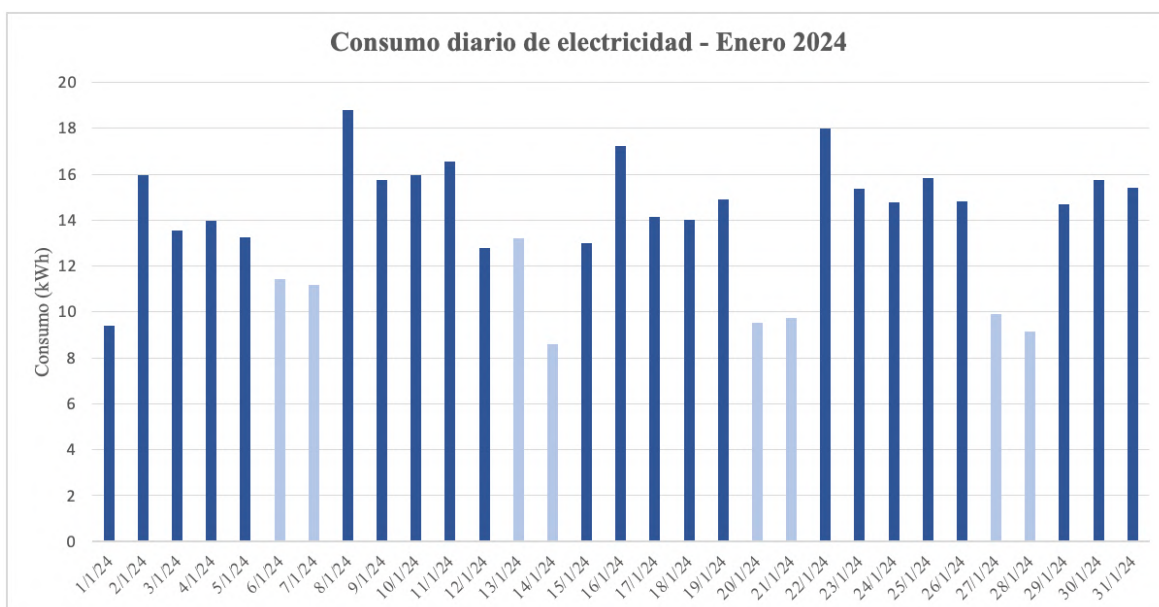


Figura 13. Consumo diario de electricidad enero 2024 [Elaboración propia]

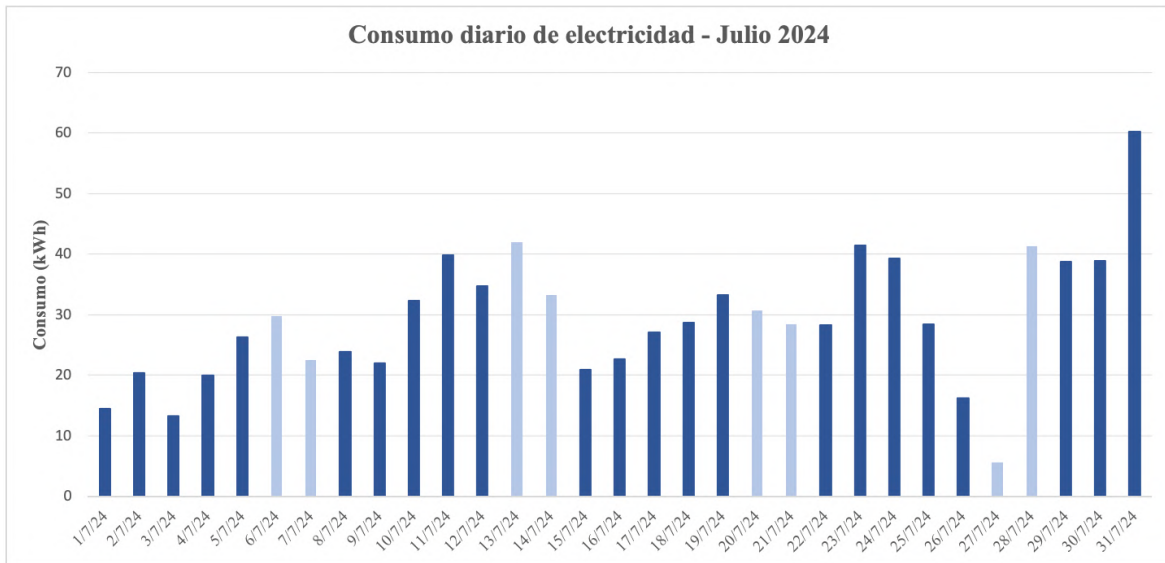


Figura 14. Consumo diario de electricidad julio 2024 [Elaboración propia]

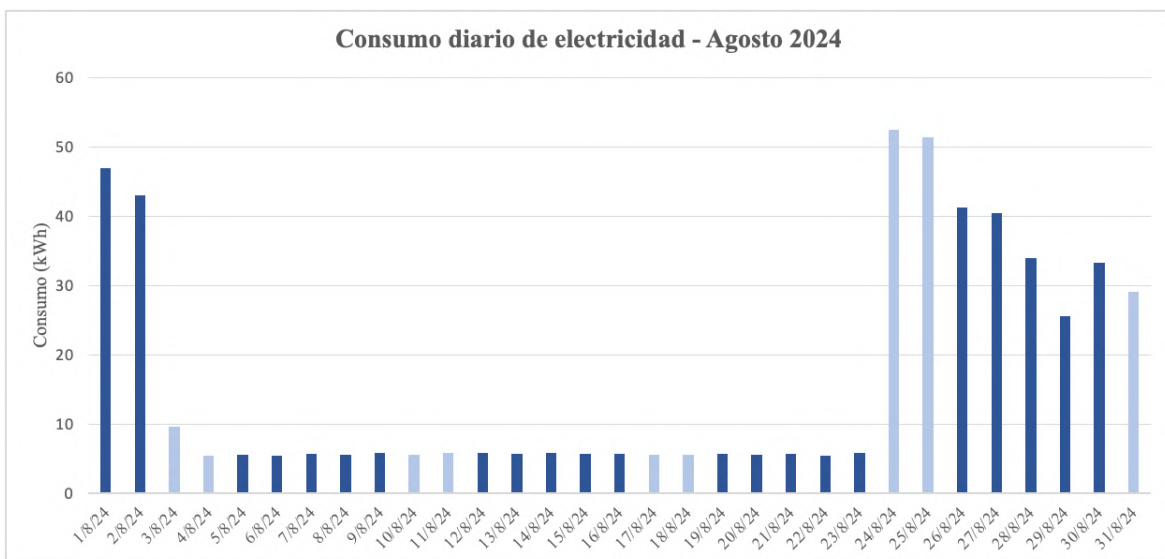


Figura 15. Consumo diario de electricidad agosto 2024 [Elaboración propia]

De los tres meses seleccionados se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Para meses estándar, en los que el aire acondicionado no supone la mayor parte del consumo, se aprecia una diferencia entre el consumo de lunes a viernes (graficado de azul oscuro) y el consumo del fin de semana (azul claro). En concreto, el consumo en fin de semana es en torno a un 30% menor que entre semana (8-10 kWh vs 13-16 kWh de media).

2. En los meses de calor el aire acondicionado acapara la mayor parte del consumo, haciendo que el consumo diario medio ascienda de en torno a 13kWh hasta 30kWh. Además, la dependencia del AC provoca que no haya apenas diferencia en el consumo entre lunes-viernes y fin de semana.
3. En el mes de agosto, en el que durante 3 semanas no hay nadie habitando en la vivienda por vacaciones, hay un significativo consumo “fantasma”. Este es el consumo de los dispositivos conectados a la red por el mero hecho de estar conectados. Se puede ver que este consumo es de en torno a 5kWh/día, lo que supondría en torno a un 30% del consumo diario medio.

Según IDAE [28], el consumo fantasma es de entre el 7 y el 11% del consumo medio de la instalación. Esta diferencia entre el valor teórico y el real podría deberse a una instalación en peor estado. No obstante, resulta más coherente atribuirlo a las dos neveras de elevada demanda energética, que no se desconectan en todas las vacaciones. Según lo visto en *Capítulo 2. Estado de la Cuestión*, estas representan el mayor consumo entre los electrodomésticos

Por último, se ha considerado necesario entender el consumo horario del hogar. Para ello se han seleccionado varios días aleatorios de meses diferentes para analizar el comportamiento con mayor nivel de detalle. Se pueden ver en la siguiente gráfica:

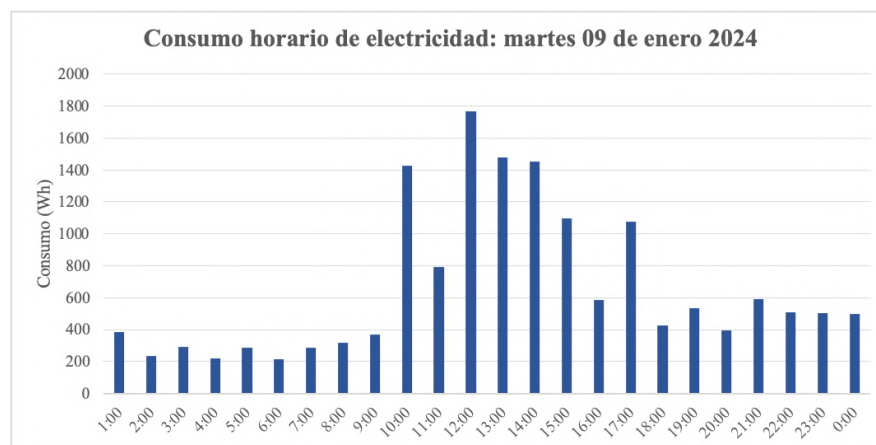


Figura 16. Consumo horario de electricidad: martes 9 de enero de 2024 [Elaboración propia]

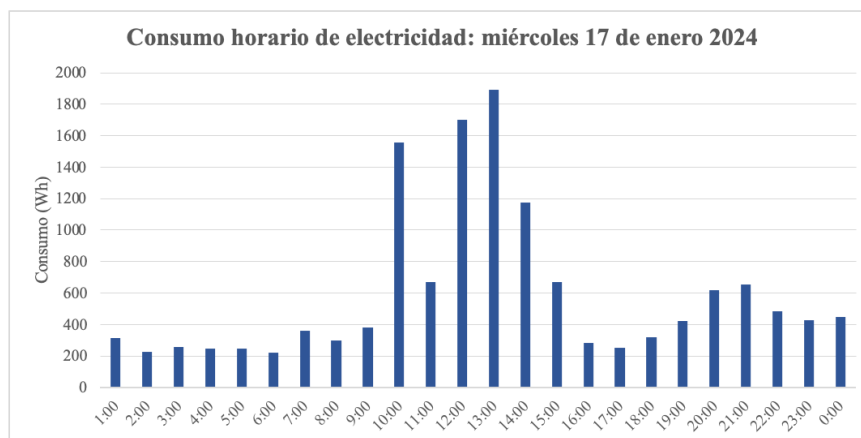


Figura 17. Consumo horario de electricidad: miércoles 17 de enero de 2024 [Elaboración propia]

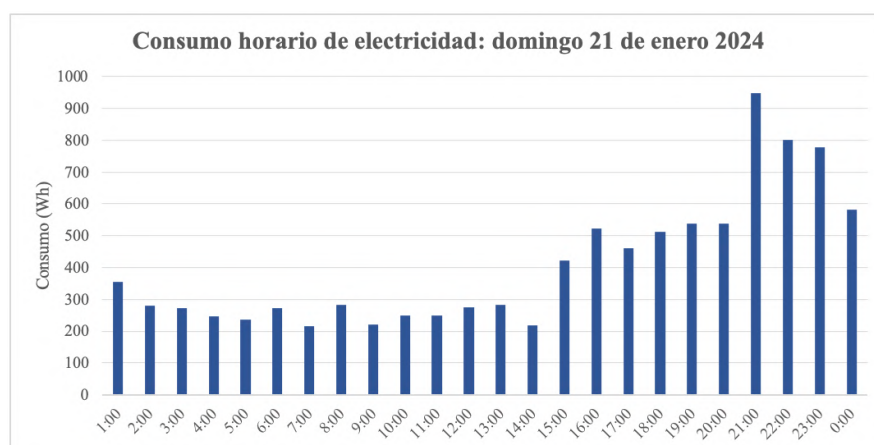


Figura 18. Consumo horario de electricidad: domingo 21 de enero de 2024 [Elaboración propia]

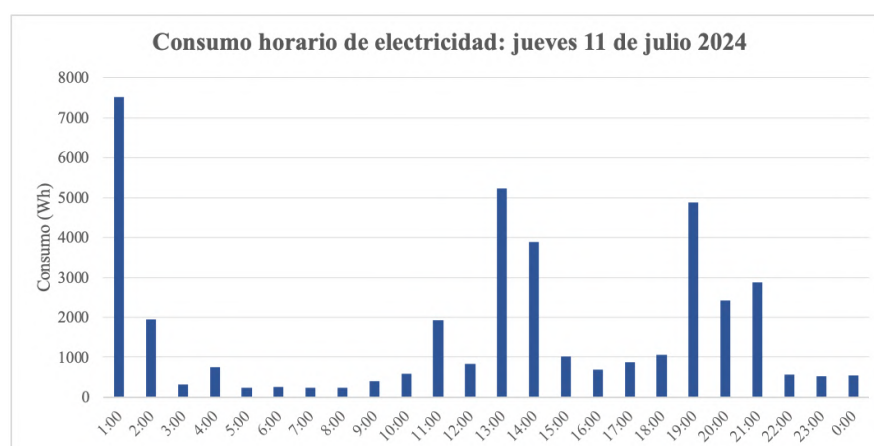


Figura 19. Consumo horario de electricidad: jueves 11 de julio de 2024 [Elaboración propia]

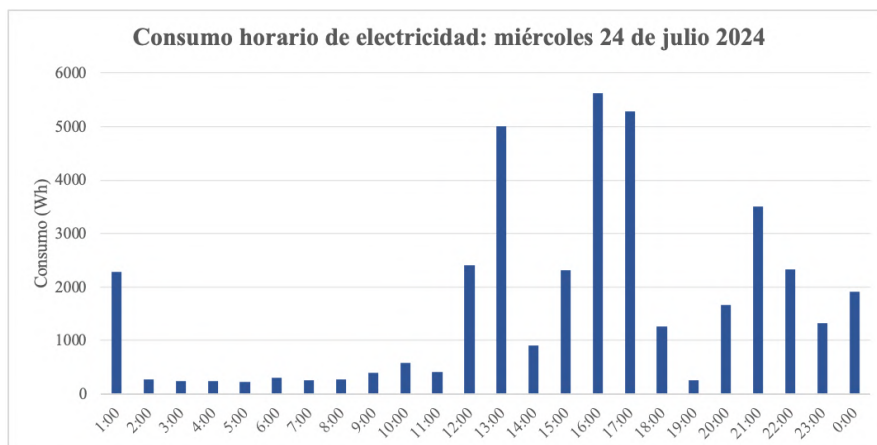


Figura 20. Consumo horario de electricidad: miércoles 24 de julio de 2024 [Elaboración propia]

De este análisis se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. En los meses estándar, el consumo no es regular a lo largo del día, registrando un mayor consumo a mediodía (a las 10 y entre las 12 y 15 horas) con valor de en torno a 1.600 Wh por cada hora.
2. Por otro lado, el consumo horario en fin de semana (especialmente domingo) es menor y más regular que entre semana. Se aprecian mayores consumos a últimas horas de la tarde y noche (20-24 horas).
3. En los meses de verano, con mayor demanda, se aprecia también un pico de demanda de 5.000 Wh alrededor de las 14 horas, acompañado de otro pico por la noche (entre las 21:00 y las 1:00 horas, con consumos de 2.000 - 7.000 Wh por hora) principalmente por el uso del AC.
4. Durante las horas valle, el consumo eléctrico de la instalación es prácticamente nulo (200 Wh por cada hora) tanto en meses estándar como meses de alta demanda, desaprovechando los respectivos beneficios económicos de consumir en esta franja horaria si se tuviese contratada la tarifa de tres periodos.

Por último, para terminar con el análisis del consumo eléctrico, se va a abordar el componente económico. Las facturas de la luz poseen una parte fija y una parte variable. La

parte fija está asociada a la potencia contratada (máxima potencia que la vivienda puede solicitar a la red, en kW) y una variable (consumo real medido, en kWh).

La vivienda actualmente cuenta con el Plan Estable de Iberdrola. Mediante este, las tarifas fija y variable permanecen constantes a lo largo del año, y su modificación año a año está limitada ($\sim +1\%$ de 2023 a 2024). En concreto, en 2024 la tarifa fija es 0,08754€/kW/día para la tarifa punta y 0,003491€/kW/día para valle; y la variable de 0,139785€/kWh.

Para un mes “estándar”, con un consumo medio de 400kWh y potencia contratada de 12kW, la factura resultante sería:

Desglose ejemplo factura "estándar" electricidad Iberdrola (1 mes, 400kWh):		
Parte fija	Tarifa (€/kW/día)	Coste asociado (€)
12kW en punta	0,08754	32,56
12kW en valle	0,003491	1,30
		33,86
Parte variable	Tarifa (€/kWh)	Coste asociado (€)
400kWh energía consumida	0,139785	55,91
		55,91
	Impuesto electricidad (5,1%):	4,58
	IVA (21%):	19,81
Factura (€):		114,17

Tabla 2. Desglose factura estándar electricidad [Elaboración propia]

A esta factura se le suman pequeños gastos adicionales por equipos de protección, así como pequeñas ayudas en forma de descuento sobre el consumo o bono social. Dado que se trata de un plan estable, que evita problemas de volatilidad de precios como los comentados en la introducción de este proyecto, el coste asociado al consumo de esta instalación debería estar ligado únicamente al consumo y no a factores externos.

Se ha enfrentado el consumo de electricidad a lo largo del periodo analizado con la factura de la luz. El resultado obtenido es el siguiente:

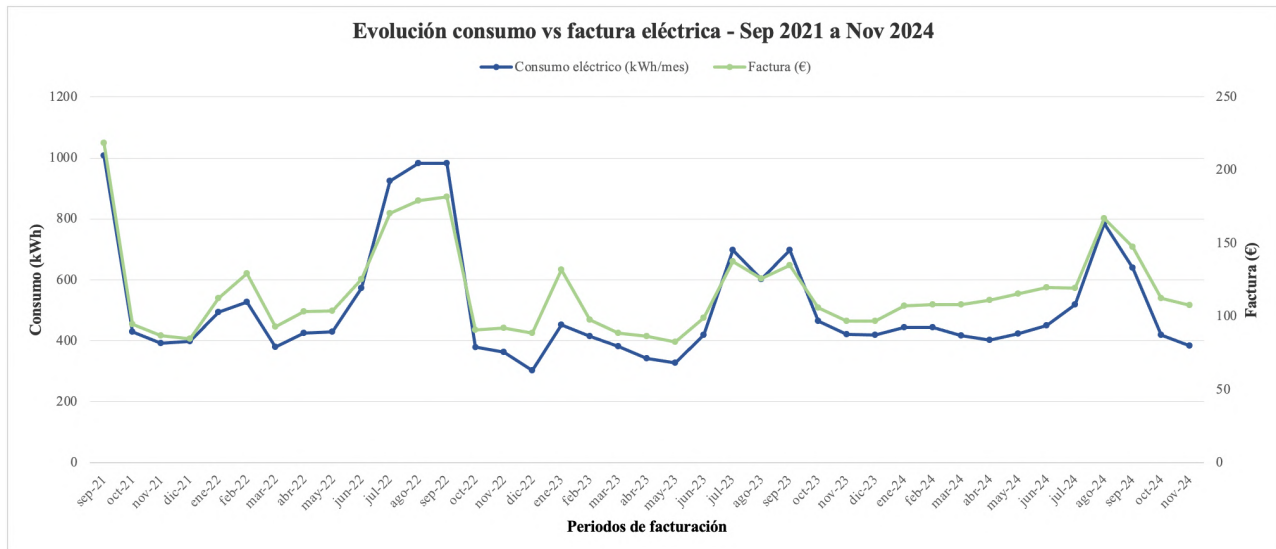


Figura 21. Evolución consumo vs factura electricidad [Elaboración propia]

Como había sido previsto, al tratarse del plan estable, la factura (€) depende exclusivamente del consumo (kW), y la variación en la tarifa de año a año tiene un impacto reducido. La tarifa ronda los 100 €/mes en los meses “estándar” y 150 €/mes en los meses pico tras la mejora de las ventanas, siendo la tarifa en meses pico antes en torno a 180 - 200 €/mes.

Otro aspecto a tener en cuenta en el análisis económico es el aumento de la parte fija de la factura en julio de 2024 por el incremento en la potencia contratada (de 8,5kW a 12kW), lo que con los números de la *Tabla 2* ha repercutido en una subida de ~10 €/mes en la factura eléctrica. Más adelante se analizará el impacto completo de dicha acción y su adecuación.

A continuación, se adjunta la misma gráfica en mayor tamaño para una mejor visualización y análisis:

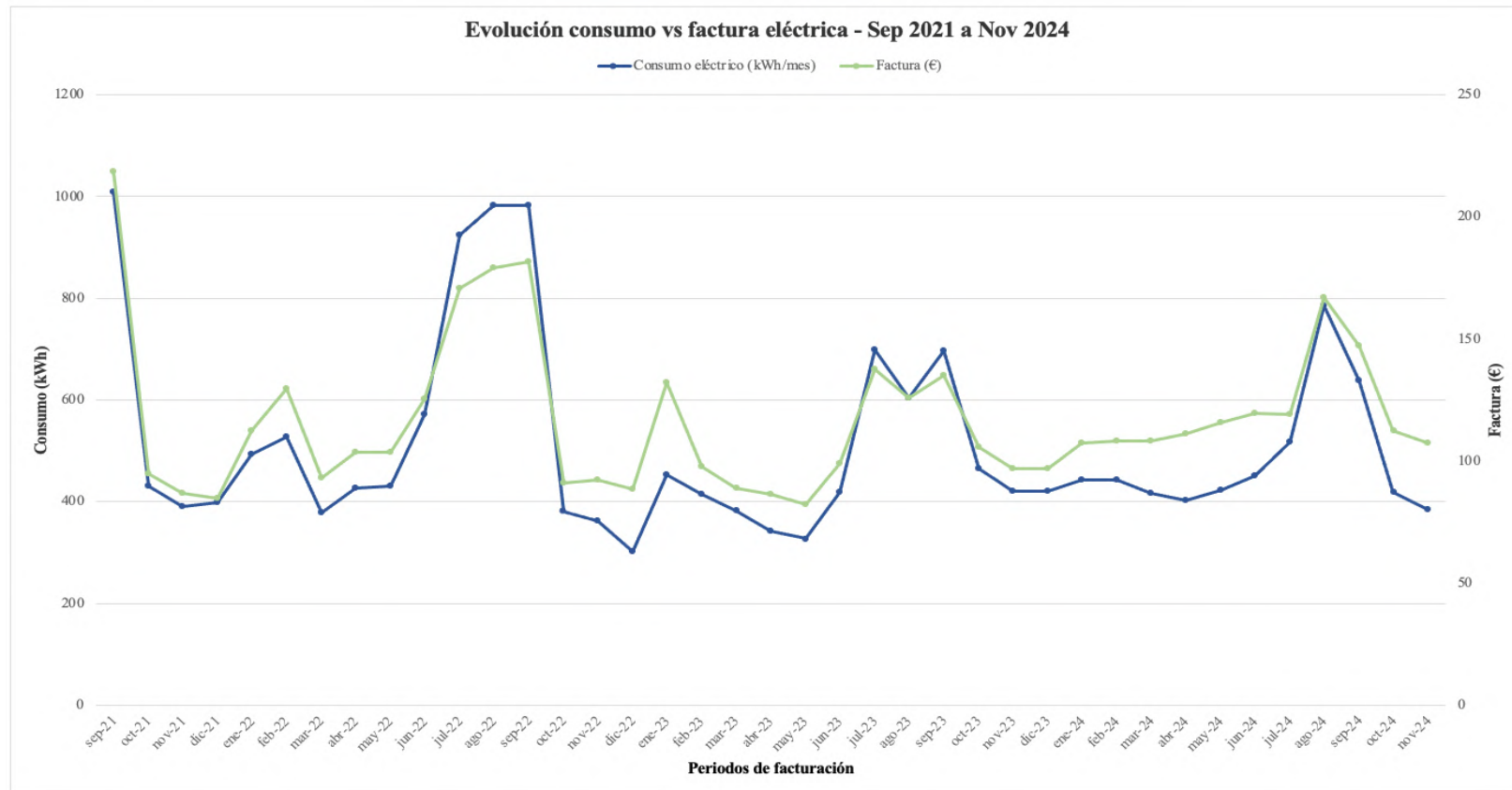


Figura 22. Consumo y facturación electricidad septiembre 21 a noviembre 24 [Elaboración propia]

3.3.2 CONSUMO DE GAS

En lo relativo al consumo de gas, por el cambio de ventanas a finales de 2022 y el de proveedor en enero de 2023, el periodo analizado para el consumo de gas es de 3 años. El objetivo es poder analizar el antes y el después de dichas acciones. La siguiente gráfica muestra la evolución en el consumo de gas de la instalación durante dicho periodo, que se factura o reporta en periodos bimensuales:

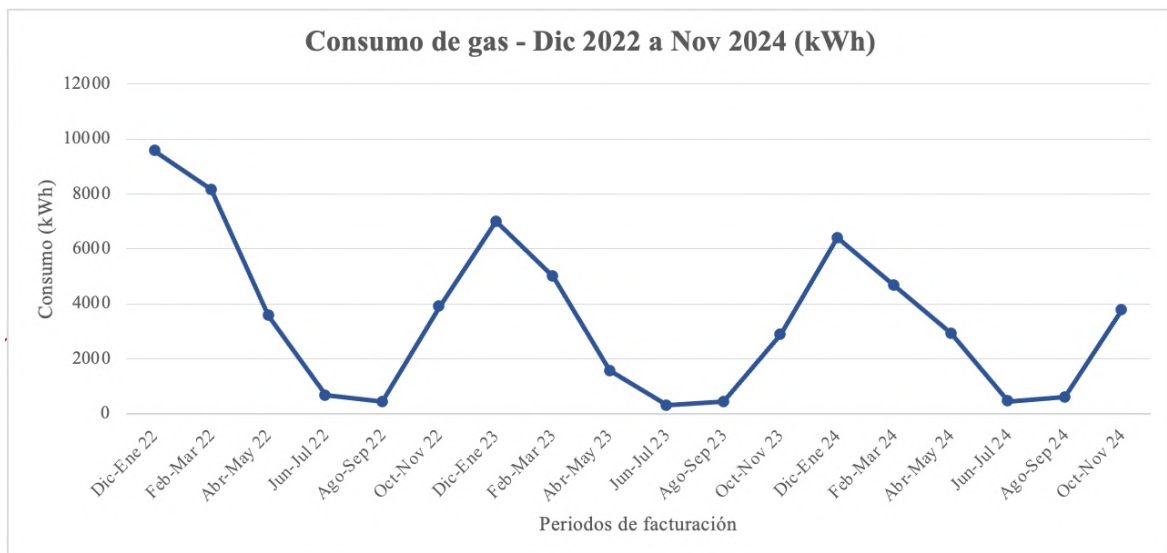


Figura 23. Consumo de gas de diciembre 2022 a noviembre 2024 [Elaboración propia]

Algunos de los principales resultados que arroja la gráfica son:

1. Existe un claro descenso en el consumo entre 2022 y 2023-2024. Esto se debe, como hipótesis inicial, a la intervención realizada en el cambio de aislamientos en toda la casa. Esto será analizado en detalle más adelante, pero una primera conclusión es que sí ha tenido un impacto relevante en el consumo del hogar, de igual manera que sucedía con el consumo eléctrico.
2. Como era de esperar, los picos de consumo de gas tienen lugar en meses fríos (noviembre a febrero), rondando los 10.000 kWh por cada periodo bimensual pre-obra y los 7.000 kWh post-obra. Por otro lado, la menor demanda es en verano (junio a septiembre), con consumo de alrededor de 400kWh por cada periodo bimensual.

La siguiente gráfica editada muestra las conclusiones comentadas:

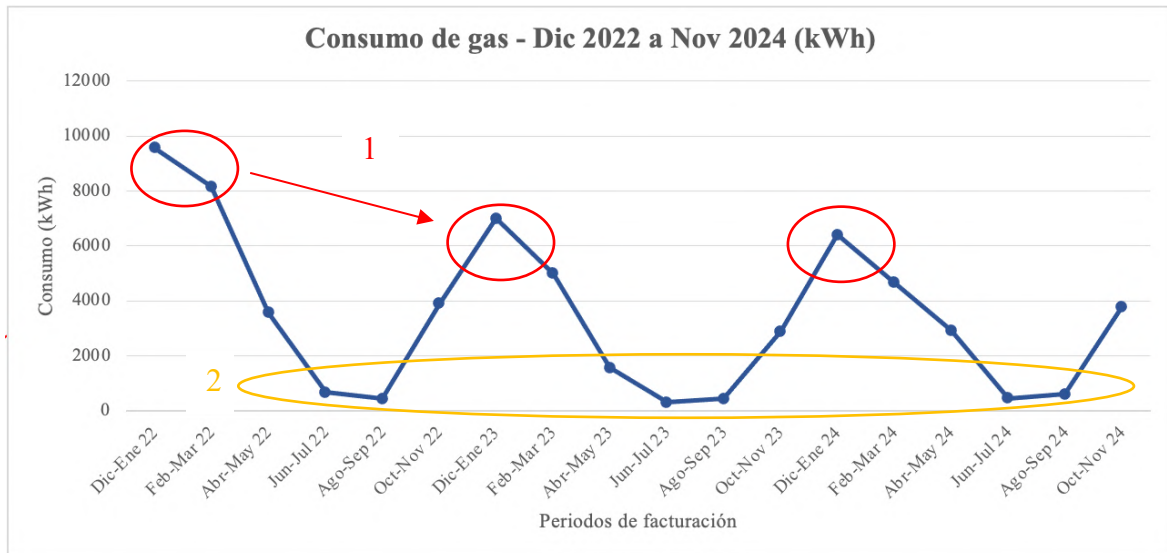


Figura 24. Análisis consumo de gas diciembre 2022 a noviembre 2024 [Elaboración propia]

Puesto que el consumo de gas viene de la caldera, con la que se calienta el hogar y el ACS, es coherente el elevado consumo en meses fríos, y no se ha considerado necesario encontrar patrones diarios u horarios al ser una demanda constante. El consumo será similar entre semana que el fin de semana, puesto que la temperatura deseada y el uso de la vivienda permanecen inalterados, y la casa se calienta igual a lo largo de todo el día. La caldera se activa para calentar hasta alcanzar el valor definido (normalmente los 22°C en esta instalación), y después se apaga hasta salirse del intervalo aceptado, y así sucesivamente. Además, la información del consumo horario y/o diario no está disponible en la plataforma de CUREnergía.

No obstante, sí se ha considerado interesante la evolución económica del consumo de gas. En el mercado regulado (con CUREnergía), se paga una cuota mensual fija por el consumo de gas. No obstante, por cada periodo de 2 meses, se emite una factura con el consumo e importe reales. A finales de año, o inicios del siguiente, se compensa la diferencia (positiva o negativa) entre lo pagado de cuota fija y la facturación real. Además, se ajusta la cuota mensual del año siguiente para adaptarla al consumo real, algo que también tiene lugar a mitad de año. Por ejemplo, en 2023 la cuota mensual era de 236€, que en enero de 2024

pasó a ser 91€ (reducción del consumo) y en julio de 2024 a 144€, donde se ha ajustado acorde al consumo real. El motivo de la cuota fija mensual es estabilizar los pagos a lo largo del año, reduciendo el impacto de la estacionalidad del consumo de gas, tratando de aplanar el coste.

La factura del gas con tarifa TUR tiene una parte fija asociada a la duración del periodo facturado (alrededor de los 2 meses), en los que se factura 14,92€/mes. Este valor puede variar ligeramente, ya que en 2022 era de 20,44€/mes. Esto está asociado principalmente al segmento de consumo (TUR 1, TUR 2, TUR 3) el cual se determina en función del consumo. Para la instalación en cuestión, con consumo de entre 15.000kWh/año y 50.000kWh/año, se trata de TUR 3. Cabe mencionar que las tarifas TUR están destinadas a consumidores individuales con consumo inferior o igual a 50.000kWh/año y presión de suministro inferior o igual a 4 bar.

A este hay que sumarle una parte variable de 0,03825092 €/kWh (abril 2024) por el consumo en ese periodo más el impuesto sobre el gas natural de 0,00234€/kWh. La parte variable de la energía consumida puede variar entre periodos, en función del precio del gas natural en el mercado mayorista (MIBGAS – Mercado Ibérico del Gas). Un ejemplo de factura de gas “estándar”, para un periodo de 2 meses con consumo 3.000kWh (equivalente a periodos de primavera u otoño es el siguiente:

Desglose ejemplo factura gas "estándar" Curenergia (2 meses 3000kWh):

Parte fija	Tarifa (€/mes)	Coste asociado (€)
Tarifa mensual	14,92	29,84
		<u>29,84</u>
Parte variable	Tarifa (€/kWh)	Coste asociado (€)
3000 kWh energía consumida	0,04625741	138,77
Impuesto gas	0,00234	7,02
		<u>145,79</u>
	IVA (21%):	36,88
Factura mensual (€):		212,51

Tabla 3. Desglose factura estándar gas [Elaboración propia]

Sin embargo, en 2022 el suministrador era Iberdrola mediante el Plan Estable. Durante este periodo se facturaba lo que se consumía, sin cuotas fijas. La factura, al igual que la informativa de CURenergía, consistía en una parte variable y una parte fija.

La siguiente gráfica muestra el consumo de gas y la facturación de este en los últimos 3 años:

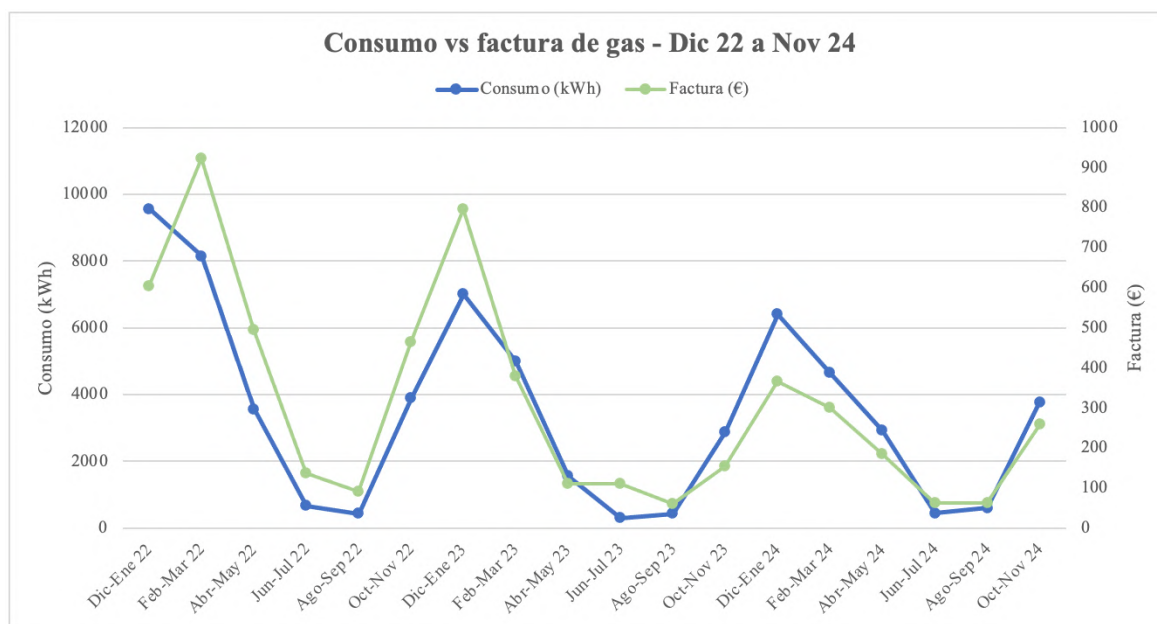


Figura 25. Consumo vs factura de gas diciembre 21 a noviembre 24 [Elaboración propia]

Existe una clara correlación entre el consumo y la factura del gas. En consecuencia, los meses más costosos son los de mayor consumo (noviembre a febrero). Además, se puede ver una considerable reducción de la factura en 2023 y 2024 respecto a 2022, asociada principalmente al ahorro energético. Sin embargo, es importante ponderar el impacto del cambio en el plan de facturación, pasando del plan estable contratado hasta enero de 2023, donde se puede ver un pico en la factura por los conflictos geopolíticos ya discutidos, al mercado regulado. Para un consumo similar, en diciembre-enero de 2024 se ahorró en torno al 50% de la factura (765€ vs 365€) en comparación con el mismo periodo del año anterior (aún plan estable).

Las facturas bimensuales más elevadas rondan los 900€ en 2022, y 400€ en 2023-2024, lo que implica un potencial ahorro del 50%. De igual manera para las más bajas, en verano se sitúan en torno a 90€ en 2022 y 60€ en 2023-2024.

Las observaciones analizadas sobre el consumo y facturación del gas pueden verse con mayor detalle en la siguiente gráfica:

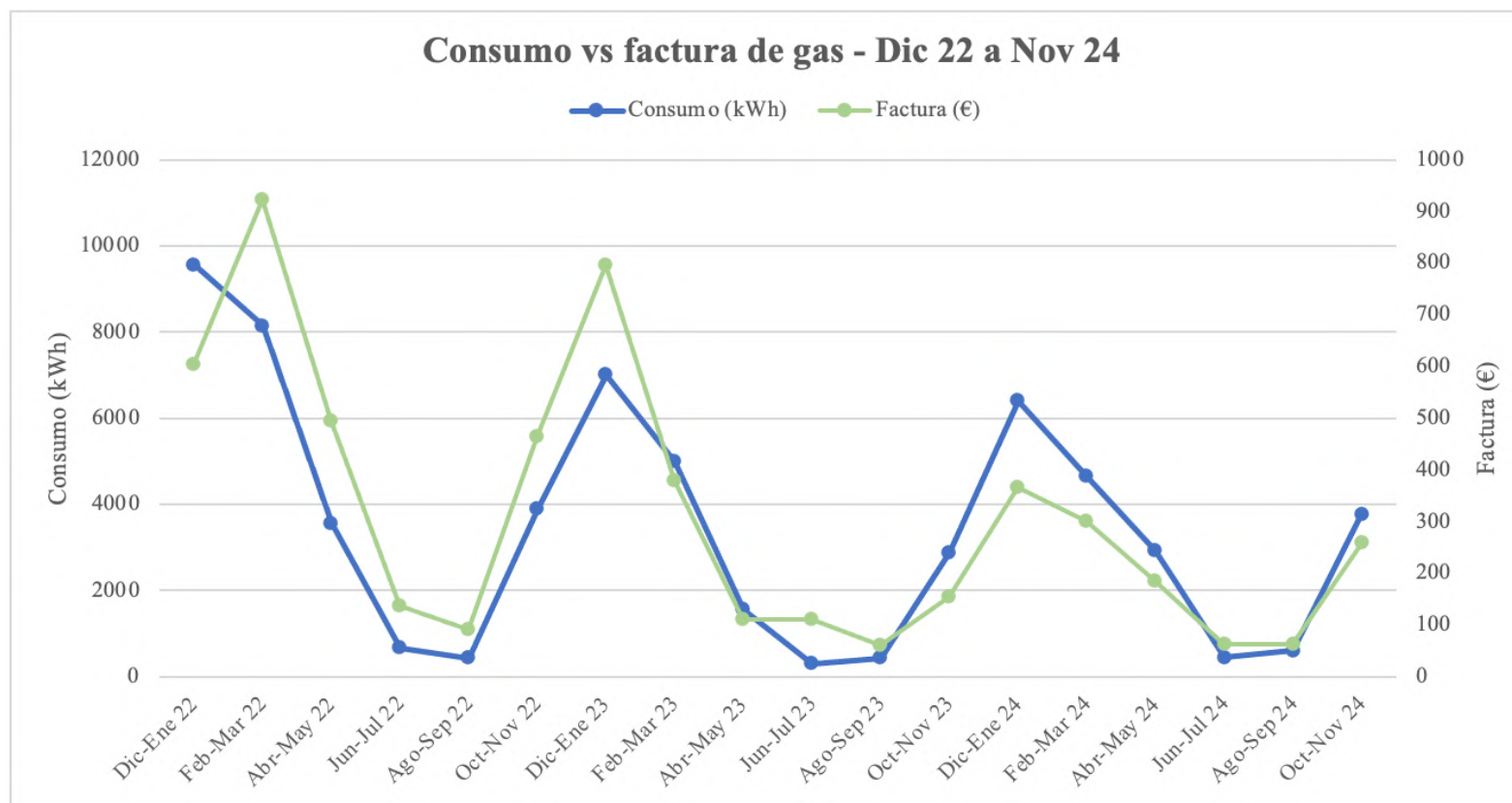


Figura 26. Detalle consumo de gas diciembre 22 a noviembre 24 [Elaboración propia]

El impacto detallado del cambio de las ventanas llevado a cabo a finales de 2022 se desarrollará en el apartado *4.1. Cambio de ventanas* del documento.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

A la hora de caracterizar energéticamente a la vivienda, es importante entender qué se incluye en un certificado de eficiencia energética, introducido en el *Capítulo 2: Estado de la Cuestión*.

La parte inicial de este informe describe el edificio o parte de edificio a certificar. Por un lado, la identificación propiamente: dirección, provincia, referencia catastral, año de construcción, etc. y por otro el tipo de edificio: edificio existente → vivienda → bloque → vivienda individual; tal y como está desarrollado en la parte de descripción de la instalación.

La parte central del documento incluye los criterios empleados para determinar la eficiencia energética, y los valores obtenidos con los rangos de cada nivel. Estos son el consumo de energía primaria no renovable en kWh/m² año, y las emisiones de dióxido de carbono en kgCO₂/m² año.

En base a lo desarrollado a lo largo de este capítulo, la instalación actual consume anualmente en torno a 18.000 kWh de gas y 5.600 kWh de electricidad, siendo ambas energías primarias no renovables. Considerando la superficie habitable de la vivienda (260 m²), el consumo anual directo es de 90,8 kWh/m². No obstante, el consumo de energía primaria medido en los certificados energéticos incluye consumo en generación y transporte.

Para la electricidad, parte de las pérdidas están asociadas a los rendimientos en la generación, que rondan el 30-50% en centrales térmicas de gas, 30% en carbón, o “100%” en renovables al no consumir un combustible [29]. Además, en la transmisión y distribución se pierden en torno al 5% de media según Yale Climate Connections y US Energy Administration [29]. Por lo tanto, teniendo en cuenta la parte renovable del mix energético

al que accede Iberdrola Comercializadora (56% en España según REE [30]), y que la parte fósil tiene un rendimiento del 40%, se necesitará en torno a un 25% adicional de energía primaria:

$$\text{Consumo de energía primaria} = (\text{Consumo final} * 0,56 + \text{Consumo final} * 0,44 / 0,4) / 0,95 = 1,75 * \text{Consumo final}$$

Nótese que en el cálculo se ha diferenciado la parte renovable del mix energético de la fósil, y se han aplicado las respectivas pérdidas de las centrales térmicas (60%) y las de transporte y distribución (5%).

En cuanto al gas, si bien su extracción y procesamiento tiene pocas pérdidas, también hay que considerar el *spillage factor* (pérdidas por escapes y fugas) y pérdidas en el transporte que dependen de si se realiza por gasoductos o como GNL en barcos. Según el documento de factores de paso del MITECO [31], la relación entre gas natural primario y final es de 1,2, habiendo un 17% de pérdidas en dichas etapas:

$$\text{Consumo de energía primaria} = \text{Consumo final} / 0,83 = 1,2 * \text{Consumo final}$$

Aplicando todo lo anterior, el consumo real de energía primaria es 21.600 kWh de gas y 9.888 kWh de electricidad, lo que supondría un consumo total de 121 kWh/m² año y por ende una clase de eficiencia energética de D.

Sin embargo, para los cálculos del certificado energético se emplea la herramienta CE3X, desarrollada por Efinovatic y el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) e impulsada y reconocida por IDAE y el Ministerio. Se trata de un software que a través de unos inputs (datos generales y administrativos, envolvente térmica, e instalaciones térmicas – calefacción y refrigeración) calcula los valores estimados de consumo y emisiones, emitiendo un informe que incluye análisis económico y propuesta de mejoras. En cuanto a la instalación en concreto, el último certificado energético realizado post-cambio de ventanas se muestra a continuación:

CERTIFICADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

IDENTIFICACIÓN DEL EDIFICIO O DE LA PARTE QUE SE CERTIFICA:

Nombre del edificio	CL CONDE DE XIQUENA 13 PI:01 Pt:DR		
Dirección	CL CONDE DE XIQUENA 13 PI:01 Pt:DR		
Municipio	Madrid	Código Postal	28004
Provincia	Madrid	Comunidad Autónoma	Comunidad de Madrid
Zona climática	D3	Año construcción	1920
Normativa vigente (construcción / rehabilitación)	Anterior a la NBE-CT-79		
Referencia/s catastrales	1151506VK4715A0007DI		

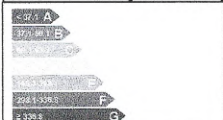
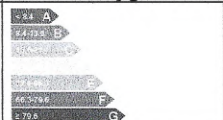
Tipo de edificio o parte del edificio que se certifica:

☐ Edificio de nueva construcción	☒ Edificio Existente
☒ Vivienda ☐ Unifamiliar ☒ Bloque ☐ Bloque completo ☒ Vivienda individual	☐ Terciario ☐ Edificio completo ☐ Local

DATOS DEL TÉCNICO CERTIFICADOR:

Nombre y Apellidos	Lucía López Belmonte	NIF(NIE)	71518724V
Razón social	López Belmonte Arquitectura e Ingeniería S.L.	NIF	B88402144
Domicilio	C/ Fernández de la Hoz nº57		
Municipio	Madrid	Código Postal	28003
Provincia	Madrid	Comunidad Autónoma	Comunidad de Madrid
e-mail:	info@certificadosbaratos.es	Teléfono	668670556
Titulación habilitante según normativa vigente	Arquitecto		
Procedimiento reconocido de calificación energética utilizado y versión:	CEXv2.3		

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA OBTENIDA:

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]	EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO2/ m² año]
	

El técnico abajo firmante declara responsablemente que ha realizado la certificación energética del edificio o de la parte que se certifica de acuerdo con el procedimiento establecido por la normativa vigente y que son ciertos los datos que figuran en el presente documento, y sus anexos:

Fecha: 26/12/2022

LOPEZ BELMONTE LUCIA - 71518724V
Firmado digitalmente por LOPEZ BELMONTE LUCIA - 71518724V
Fecha: 2022.12.26 08:24:33 +01'00'

Firma del técnico certificador

Anexo I. Descripción de las características energéticas del edificio.

Anexo II. Calificación energética del edificio.

Anexo III. Recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética.

Anexo IV. Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico certificador.

Registro del Órgano Territorial Competente:

Figura 27. Certificado energético post-intervención (diciembre 2022)

Como se puede observar, en diciembre de 2022 se caracterizó a la vivienda como clase E tanto en consumo como emisiones. En concreto, se estimó un consumo de energía primaria no renovable de 168,8 kWh/m² año y unas emisiones de 32,8 kgCO₂/m² año. En

términos de consumo energético primario, el valor estimado previamente con el consumo real supone una reducción del 28% respecto al teórico del certificado.

A su vez, en cuanto al impacto medioambiental del consumo de la instalación, se han estimado las emisiones dióxido de carbono según los factores de emisión proporcionados por el MITECO en 2023 [32]. En el consumo eléctrico, para la comercializadora en cuestión, Iberdrola Clientes S.A.U., el documento precisa un factor de 0,241 kg CO₂/kWh. Por lo tanto, con un consumo eléctrico primario de en torno a 9.888 kWh, se emiten alrededor de 2.383 kg de CO₂ al año.

En cuanto al consumo de gas, el MITECO [31] estima un factor de emisiones de 0,252 kg CO₂/kWh para el gas natural, incluyendo emisiones directas e indirectas. Es importante mencionar que, aunque este valor sea similar al del kWh eléctrico, la menor eficiencia del gas resulta en una notable mayor cantidad de emisiones por kWh útil (calor). O lo que es lo mismo, para una misma función (calefacción), los sistemas eléctricos consumen un menor número de kWh que los térmicos, suponiendo en neto menores emisiones.

Considerando el consumo primario de 21.600 kWh de gas, se emiten alrededor de 5.443 kg CO₂.

Con todo lo anterior, las emisiones anualizadas de CO₂ de la vivienda serían de en torno a 7.826 kg, lo que resultaría en una proporción de 30,1 kg CO₂/m² año y por ende una clase de eficiencia energética D. Esto implicaría una reducción del 8% respecto al valor estimado de 32,8 kg CO₂/m².

La reducción en los valores de consumo y emisiones reales (calculados a partir del consumo energético de los últimos años) respecto a las estimaciones teóricas generadas mediante el software CEXv2.3 se pueden explicar por los siguientes factores:

1. Hábitos de consumo más eficientes:

- Temperaturas de consigna ajustadas: uso de temperaturas moderadas en invierno (inferiores al estándar) y en verano (superiores al estándar).

- Optimización del tiempo de funcionamiento: reducción de horas de uso de sistemas de climatización y mejora en el uso de electrodomésticos (lavadoras, lavavajillas, etc.).
- Gestión térmica de la vivienda: uso adecuado de la instalación, como cierre eficiente de ventanas y puertas para minimizar pérdidas térmicas.

2. Rendimiento superior de equipos y cerramientos:

- Electrodomésticos de mayor eficiencia energética: un equipamiento más moderno y eficiente, con fabricantes de calidad, reduce significativamente el consumo eléctrico respecto a los supuestos medios.
- Nuevas ventanas instaladas: unas ventanas de mayor calidad, con materiales más eficientes, pueden ofrecer un mejor rendimiento térmico en condiciones reales que el previsto por los valores estándar o teóricos en el software CEXv2.3.

3. Condiciones climáticas favorables:

- Inviernos menos severos: menor necesidad de calefacción en comparación con las condiciones climáticas históricas asumidas en los cálculos del CEXv2.3.
- Veranos menos calurosos: reducción de la demanda de aire acondicionado.

4. Patrones de uso específicos de la vivienda:

- Menor ocupación: un menor número de habitantes en la vivienda respecto al promedio asumido según el tamaño reduciría la demanda energética.
- Ausencia prolongada: periodos de desocupación de la vivienda por viajes o estancias temporales en otros lugares provocarían una disminución en el consumo energético.

Además, el hecho de que no exista proporcionalidad en la reducción de consumo (28%) respecto a la reducción de emisiones (8%) se explica por un mayor uso de gas respecto a la media española, lo que implica una menor descarbonización en el mix energético del hogar.

Capítulo 4. ESTUDIO DE INTERVENCIONES PREVIAS

Una vez analizado y comprendido el consumo tanto de gas como de electricidad de la vivienda, y habiéndola caracterizado energéticamente, los próximos pasos son el análisis de intervenciones realizadas en el pasado y de posibles intervenciones futuras en este ámbito. Este capítulo se centrará en acciones ya realizadas, explicando la intención detrás y tratando de evaluar el impacto en términos energéticos y económicos.

Se estudiarán dos acciones llevadas a cabo recientemente: cambio de ventanas entre septiembre y diciembre de 2022 (en dos tandas) y aumento de la potencia contratada en julio de 2024.

4.1 CAMBIO DE VENTANAS

Al tratarse de una vivienda antigua, construida en 1920, y a pesar de estar reformada en 2017-2018, la vivienda contaba con unas ventanas poco adecuados en materia de eficiencia energética. Además, no sólo poseían poco aislamiento térmico sino también acústico, lo que se traducía en una peor calidad de vida.

Por ello, en septiembre de 2022 se llevó a cabo una reforma de cambio de aislamientos interiores (habitaciones y baños, hall de entrada), y posteriormente en noviembre de 2022 se complementó con la de los aislamientos exteriores (salón-comedor y cocina). El objetivo era reducir el consumo energético y aumentar el aislamiento acústico. En lo que respecta a este proyecto de auditoría energética, esta sección va a evaluar el cambio en términos energéticos y económicos, así como mencionando en el análisis otros aspectos intangibles que hay que considerar como la mejora en la calidad de vida.

Las reformas incluyen las siguientes ventanas, con sus respectivas descripciones, especificaciones técnicas e importes unitarios:

Elemento	Descripción	Dimensiones (mm)	Cantidad	Permeabilidad al aire	Transmitancia térmica (W/m ² ·K)	Factor solar	Transmisión luminosa	Atenuación acústica (dB)	Coste unitario (€)
Puerta abatible	Dos hojas doble acristalamiento guardian select 4/24/Climaguard de 4mm	1185 x 2735	4	4	1,27	0,58	0,82	33 (-1, -6)	1.130 €
Ventana oscilobatiente	Una hoja con doble acristalamiento guardian select mate 4/24/Climaguard de 4mm	735 x 1725	1	4	1,27	0,58	0,82	33 (-1, -6)	490 €
Ventana oscilobatiente	Dos hojas con doble acristalamiento guardian select 4/24/Climaguard de 4mm	1025 x 1765	1	4	1,27	0,58	0,82	33 (-1, -6)	720 €
Ventana oscilobatiente	Una hoja con doble acristalamiento guardian select 4/24/Climaguard de 4mm	555 x 1735	1	4	1,27	0,58	0,82	33 (-1, -6)	430 €
Ventana oscilobatiente	Una hoja con doble acristalamiento guardian select 4/24/Climaguard de 4mm	835 x 1730	2	4	1,27	0,58	0,82	33 (-1, -6)	480 €
Puerta vidriera balcón exterior	Puertas vidrieras en madera de Pino Oregón con hueco para alojar climalit (4+24+4)	1300x2800	5	4	1,39	0,21	0,5	33 (-1, -6)	2.100 €
Presupuesto total obra:									17.620,00 €

Tabla 4. Características nuevas ventanas [Elaboración propia]

Para hacer un análisis objetivo de la intervención, se van a describir las ventanas previas, analizando las diferencias en cuanto a propiedades de unas y otras. Posteriormente, se va a medir el impacto real en el consumo de la vivienda, comparando los meses previos a las obras con los posteriores y usando lo analizado en el *Capítulo 3.3: Análisis del consumo energético*. Por último, se evaluará el ámbito económico calculando las principales métricas de rentabilidad usadas en inversiones (periodo de retorno o *payback period*, VAN, TIR, etc.).

Anteriormente la vivienda contaba con ventanas de vidrio simple (no Guardian Select doble climalit con cámara de Argón) y marcos de madera estándar (no pino de Oregón) en todos ellos, tanto los interiores como los exteriores. El diseño de todos era similar al actual de las cinco ventanas exteriores, siendo una sección (zona inferior y laterales) de madera y el resto de vidrio; mientras que en la actualidad las interiores son mayoritariamente vidrio.

Un parámetro esencial de aislamiento es el coeficiente de transmitancia térmica (U). Este se mide en $W/(m^2 \cdot K)$ y representa la cantidad de energía disipada instantánea (W) por m^2 y K. Se mide como:

$$U = \frac{\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]}{\text{grosor} [m]}$$

Donde λ representa la conductividad térmica del material. A mayor grosor o menor conductividad, menor resulta el valor de U y por lo tanto menor transmisión térmica (mejor aislamiento térmico).

En las ventanas, se ha sustituido vidrio simple ($U \sim 5,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$) y marcos de madera estándar, con transmitancia global de $3,08 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ según certificado mediante CEXv2.3, a doble acristalamiento GuardianSelect y madera de Pino de Oregón (resultando $U = 1,49 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ según fabricante y $1,27$ según certificado CEXv2.3). A pesar de que la madera es mejor aislante térmico que el vidrio, el uso de tecnologías avanzadas (cámaras de aire con gas Argón, doble acristalamiento, etc.) resultan en una menor transmitancia en los cristales de la instalación que en la madera.

Las siguientes tablas muestran los parámetros estimados de las ventanas anteriores y posteriores a la intervención, de acuerdo con el software CEXv2.3, mediante certificados realizados antes y después de la obra. Nótese que el hueco V5 o VE(6) ha permanecido prácticamente inalterado al ser el único no modificado:

Huecos y lucernarios

Nombre	Tipo	Superficie [m ²]	Transmitancia [W/m ² ·K]	Factor solar	Modo de obtención. Transmitancia	Modo de obtención. Factor solar
V E (1.2.3)	Hueco	9.72	3.08	0.02	Estimado	Estimado
V E (4.5)	Hueco	6.48	1.97	0.02	Estimado	Estimado
V N (1)	Hueco	2.97	3.08	0.61	Estimado	Estimado
V O (1.2)	Hueco	2.72	3.08	0.02	Estimado	Estimado
V S (1)	Hueco	2.97	3.08	0.01	Estimado	Estimado
V S (2)	Hueco	1.36	3.08	0.01	Estimado	Estimado
V N (2)	Hueco	2.97	3.08	0.01	Estimado	Estimado
V E (6)	Hueco	0.35	3.78	0.37	Estimado	Estimado

Nombre	Tipo	Superficie [m ²]	Transmitancia [W/m ² ·K]	Factor solar	Modo de obtención. Transmitancia	Modo de obtención. Factor solar
V E (7.8)	Hueco	5.94	3.08	0.02	Estimado	Estimado

Tabla 5. Ventanas previas a la intervención

Huecos y lucernarios

Nombre	Tipo	Superficie [m ²]	Transmitancia [W/m ² ·K]	Factor solar	Modo de obtención. Transmitancia	Modo de obtención. Factor solar
05. Huecos V1 x5	Hueco	19.57	1.39	0.21	Conocido	Conocido
06. Huecos V2 x2	Hueco	7.28	1.27	0.58	Conocido	Conocido
02. Hueco V3	Hueco	1.2	1.27	0.58	Conocido	Conocido
02. Hueco V4	Hueco	2.13	1.27	0.58	Conocido	Conocido
07. Hueco V5	Hueco	0.27	3.54	0.68	Estimado	Estimado
01. Hueco V6(A)	Hueco	3.71	1.27	0.58	Conocido	Conocido

Nombre	Tipo	Superficie [m ²]	Transmitancia [W/m ² ·K]	Factor solar	Modo de obtención. Transmitancia	Modo de obtención. Factor solar
04. Hueco V6(B)	Hueco	3.71	1.27	0.58	Conocido	Conocido
08. Huecos V7 x2	Hueco	3.52	1.27	0.58	Conocido	Conocido
04. Hueco V8	Hueco	1.57	1.27	0.58	Conocido	Conocido

Tabla 6. Ventanas posteriores a la intervención

Como se mencionaba anteriormente, se puede apreciar una mejora de la transmitancia de $3,08 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ (previos, todos iguales) a $1,39 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ o $1,27 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ en función de si son exteriores o interiores por el fabricante.

Si se tienen en cuenta las superficies y las transmitancias de las ventanas, se puede calcular la potencia disipada en función de la diferencia de temperatura, dado que el calor disipado se calcula como $Q = U \cdot A \cdot (T_e - T_i)$. Aunque este concepto se explicará en detalle más adelante, el producto $U \cdot A$ previo a la obra es de $102,3 \text{ W/K}$, mientras que el posterior a la obra es de $57,5 \text{ W/K}$, lo que representa una **mejora del 44% en disipación térmica (W/K)** de huecos y lucernarios.

Para mayor detalle, se adjunta el certificado energético anterior a la obra, en el que se recomendaba el cambio de ventanas y se cuantificaba el potencial impacto de la mejora:

CERTIFICADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

IDENTIFICACIÓN DEL EDIFICIO O DE LA PARTE QUE SE CERTIFICA:

Nombre del edificio	-		
Dirección	CL CONDE DE XIQUENA 13 Pt:01 Pt:DR		
Municipio	MADRID	Código Postal	28004
Provincia	Madrid	Comunidad Autónoma	Comunidad Madrid de
Zona climática	D3	Año construcción	1920
Normativa vigente (construcción / rehabilitación)	Anterior a la NBE-CT-79		
Referencia/s catastral/es	1151506VK4715A0007DI		

Tipo de edificio o parte del edificio que se certifica:

☐ Edificio de nueva construcción	☒ Edificio Existente
☒ Vivienda ☐ Unifamiliar ☒ Bloque ☐ Bloque completo ☒ Vivienda individual	☐ Terciario ☐ Edificio completo ☐ Local

DATOS DEL TÉCNICO CERTIFICADOR:

Nombre y Apellidos	Noelia Asensi Hernández	NIF(NIE)	47606257y
Razón social	-	NIF	-
Domicilio	Calle Principat de Catalunya 22		
Municipio	Corbera de Llobregat	Código Postal	08757
Provincia	Barcelona	Comunidad Autónoma	Cataluña
e-mail:	reg.nasensi@gmail.com	Teléfono	854611066
Titulación habilitante según normativa vigente	Arquitecto		
Procedimiento reconocido de calificación energética utilizado y versión:	CEXv2.3		

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA OBTENIDA:

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]	EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO ₂ / m² año]
 209.8 E	 40.9 E

El técnico abajo firmante declara responsablemente que ha realizado la certificación energética del edificio o de la parte que se certifica de acuerdo con el procedimiento establecido por la normativa vigente y que son ciertos los datos que figuran en el presente documento, y sus anexos:

Fecha: 30/05/2022

Firmado por NOELIA ASENSI HERNANDEZ el día 02/06/2022 con un certificado emitido por AC Firmaprofesional - CUALIFICADOS

Firma del técnico certificador

Anexo I. Descripción de las características energéticas del edificio.
Anexo II. Calificación energética del edificio.
Anexo III. Recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética.
Anexo IV. Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico certificador.

Registro del Órgano Territorial Competente:

Fecha 02/06/2022
Ref. Catastral 1151506VK4715A0007DI

Página 1 de 7

Figura 28. Certificado energético pre-intervención (mayo 2022)

La instalación contaba con una eficiencia energética de clase E y un consumo energético de 209,8 kWh/m² por año con emisiones de 40,9 kgCO₂/m² anuales. Además, se propuso la siguiente mejora que consistía en el cambio de aislamientos en fachada exterior:

	IDENTIFICACIÓN	Ref. Catastral	1151506VK4715A0007DI	Versión informe asociado	30/05/2022
	Id. Mejora	Programa y versión	CEXv2.3	Fecha	02/06/2022

Informe descriptivo de la medida de mejora

DENOMINACIÓN DE LA MEDIDA DE MEJORA
Mejora de aislamiento

DESCRIPCIÓN DE LA MEDIDA DE MEJORA
Características de la medida (modelo de equipos, materiales, parámetros característicos) Se recomienda la adición de aislamiento térmico en fachada por el exterior.
Coste estimado de la medida 7000.0 €
Otros datos de interés

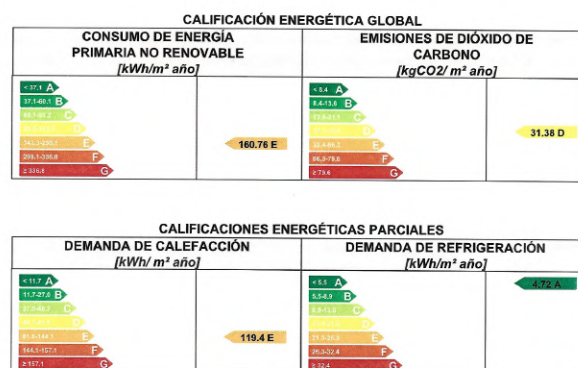


Figura 29. Propuesta de mejora de ventanas (aislamiento)

Es decir, se estimó una potencial mejora en el consumo de 209,8 a 160,76 kWh/m² año, lo que representa una reducción del consumo de 23,3%. Además, el presupuesto estimado para la intervención fue de 7.000€. No obstante, la complejidad de la obra por el diseño (ventanas oscilobatientes, puertas vidrieras conservando diseño) y la calidad de los materiales (doble acristalamiento Guardian Select, madera de Pino de Oregón), así como cambiar ventanas interiores también, han supuesto un encarecimiento de 10.620€. Por ende, el presupuesto real es de 17.620€.

En las siguientes secciones se va a desarrollar el análisis del impacto real de la mejora, medido en términos de reducción de consumo energético y rentabilidad económica.

4.1.1 IMPACTO EN EL CONSUMO

Para determinar el impacto real en el consumo energético de la instalación se han empleado los datos reales de consumo de electricidad y gas analizados en el capítulo 3 del proyecto. A su vez, ya que las obras finalizaron en noviembre de 2022, se han escogido periodos de mismas condiciones que sirvan como referencia pre-obra y post-obra: diciembre 2021 a noviembre 2022 (pre-obra), diciembre 2022 a noviembre 2023 (post-obra) y diciembre 2023 a noviembre 2024 (post-obra).

De este modo, los 3 periodos analizados (I, II y III) y sus respectivos consumos anualizados de electricidad y gas en kWh son:

Periodo	Consumo eléctrico (kWh)	Consumo de gas (kWh)
I) Dic 21 a Nov 22	6858	26260
II) Dic 22 a Nov 23	5523	17167
III) Dic 23 a Nov 24	5744	18773

Tabla 7. Evolución de los consumos pre-intervención vs post-intervención [Elaboración propia]

Por lo tanto, se puede estimar que el **ahorro medio anual en electricidad** desde la intervención ronda los **1.200 kWh/año**, lo que equivale a un **17,5%** del consumo eléctrico pre-obra. Por otro lado, el consumo de **gas** se reduce en torno a **8.250 kWh/año**, o un **31%** respecto al consumo pre-intervención.

Para maximizar la objetividad y certeza de las conclusiones halladas en este análisis, también hay que analizar las condiciones externas de cada uno de los periodos que hayan podido repercutir en el consumo. El uso de la vivienda ha sido similar en los tres periodos, así como el método de contabilización del consumo. Por otro lado, no se han cambiado ni los equipos de climatización ni los principales consumos del hogar.

Sin embargo, en lo ambiental, meses de mayor temperatura media en invierno pueden inducir en un menor uso de la caldera (reduciendo el consumo de gas), o viceversa con una menor temperatura en verano y el consumo de electricidad vía AC. Por ello se ha analizado la temperatura mensual media para los tres periodos estudiados, con datos obtenidos de la AEMET [33] y relativos a la estación climatológica Madrid Retiro por proximidad a la instalación en cuestión:

Periodo	Tª media invierno (diciembre a febrero)	Tª media verano (junio a septiembre)
I	8,8	26,0
II	7,8	25,1
III	8,5	25,0

Tabla 8. Análisis temperatura media mensual estación Madrid Retiro a lo largo de los periodos analizado [33] [elaboración propia]

Cómo se puede apreciar, no hay una variación significativa en la temperatura media de invierno (considerada de diciembre a febrero por ser los meses más fríos) ni en la de verano (junio a septiembre). De hecho, en lo relativo al consumo de gas, los periodos II y III tienen menor temperatura media en invierno aun con un notable menor consumo de gas. Sin embargo, por la similitud entre los periodos I y III, y por seguir criterios conservadores, se ha optado por despreciar dicha variación en el cálculo del ahorro de gas.

En cuanto al consumo de electricidad, se observa que temperaturas ligeramente menores en verano en los periodos post-obra podrían justificar parcialmente el descenso en el consumo, aunque la variación a priori parece reducida en comparación con el ahorro interanual.

Si consideramos la fórmula de transferencia de calor por transmisión de la Ley de Fourier, para cuantificar el calor transferido del exterior al interior en verano:

$$Q = U \cdot A \cdot (T_e - T_i) ;$$

Donde U es el coeficiente de transmisión térmica de la ventana [$W/(m^2 \cdot K)$], A es el área [m^2] y $T_e - T_i$ la diferencia entre temperaturas exterior e interior.

Por lo tanto, la diferencia entre las fugas en el periodo I y los periodos II y III, teniendo en cuenta que la temperatura interior es la misma (22°C) y suponiendo que las ventanas tuviesen mismo U (el objetivo de este análisis es cuantificar el impacto externo, no el del propio cerramiento):

$$Q_{\text{pre}} - Q_{\text{post}} = U \cdot A \cdot (T_{\text{e,pre}} - T_{\text{e,post}})$$

Y al haber en el periodo I una diferencia de 1°C (o 1K) más en el exterior respecto a los periodos II-III:

$$Q_{\text{pre}} - Q_{\text{post}} = U \cdot A \text{ [W]}$$

Sabiendo el coeficiente de transmisión térmica de las nuevas ventanas (mostrados en las *Tablas 4 y 6*) cuyo valor es de 1,27 W/(m²·K) en los interiores y 1,39 en los cinco exteriores, según el fabricante y cálculos propios, así como las áreas de estos:

$$Q_{\text{PI}} - Q_{\text{PII-III}} = 50,56 \text{ W}$$

Considerando los 4 meses de verano en los que se emplea el AC, esto podría suponer un consumo adicional de en torno a 145,6 kWh. En consecuencia, los 1.200kWh de ahorro de electricidad se han ajustado a 1.050 kWh corrigiendo la diferencia térmica de unos periodos a otros.

Por ende, en total se ahorran alrededor de **9.300 kWh al año**, lo que implica un ahorro energético del 28% debido a la intervención. En consecuencia, el 23% estimado en la propuesta de mejora (*Figura 29*) se aproxima razonablemente al valor real obtenido.

Y en lo relativo al impacto medioambiental, empleando los factores de emisión del MITECO [32], comentados en 3.4. *Caracterización de la eficiencia energética*, y las conversiones a energía primaria, esta reducción del consumo se traduce en un ahorro de en torno a 2.937 kg de CO₂ al año, lo que representa un ahorro del 27% de las emisiones totales pre-intervención.

4.1.2 MODELO ECONÓMICO

Traduciendo los ahorros energéticos en impacto económico, se ha planteado un modelo económico con un plazo de 35 años. El motivo es la alta vida útil de las ventanas (entre 20 y 40 años para doble y triple acristalamiento con cámara de Argón según Ottawa Window Medics [34], además de la garantía de 10 años del fabricante), así como la visión a largo plazo del uso de la instalación. Si se pretendiese cambiar de vivienda en el corto plazo, se podría implementar una menor duración (10-15 años), que a su vez tuviera mayor certeza. Sin embargo, dado que el usuario va a amortizar las mejoras en el largo plazo, se ha optado por una mayor duración del modelo económico.

Uno de los principales inconvenientes de una duración de 35 años en el modelo es la incertidumbre. La volatilidad del sector energético y las continuas incidencias geopolíticas y medioambientales provocan menor certeza en los precios a largo plazo. Sin embargo, dado que se dispone de plan estable en electricidad y sector regulado en gas, se asumirá una tendencia razonable y similar a los últimos años.

Los “ingresos” o el retorno de la inversión se miden año a año como ahorro energético anual debido al cambio de ventanas, el cual es de 1.050 kWh/año de electricidad y 8.250 kWh/año de gas, como se ha justificado en el capítulo previo. Para cuantificar este ahorro sólo se tendrá en cuenta la parte variable de las facturas (€/kWh e impuestos), con un ligero crecimiento anual en línea con lo de los últimos años y similar al IPC, con valor medio de 2,31% en los últimos 10 años según el INE [35].

En concreto, el plan Estable de Iberdrola cuenta con ligeras variaciones en la factura de año a año, haciendo que se pueda estimar de manera razonable la facturación futura. Se considerará un coste variable inicial de 0,13979 €/kWh, más el impuesto de la luz del 5,1% sobre el coste, de acuerdo a 2024. Para el gas, se supondrá que se continua en el mercado regulado CUREnergía debido a las vigentes tensiones geopolíticas y su potencial impacto en la volatilidad del precio del gas. Por lo tanto, el precio estará compuesto de un coste variable de 0,04625741 €/kWh, a los que habrá que sumar el impuesto al gas de 0,00234 €/kWh. El desglose de las facturas se puede ver en: *Tabla 2 y Tabla 3*.

Adicionalmente, se ha incluido el ingreso devengado en forma de ayuda del gobierno por medidas de sostenibilidad tras la realización de la obra, el cual se obtuvo tras la renta del año fiscal 2022 y tuvo un importe de 1.000€.

En lo relativo a los costes, se expresan como CAPEX por el desarrollo del cambio de aislamientos, el cual incluye materia prima y mano de obra, y tuvo una cuantía de 17.620€. La obra no tiene asociados costes de operación (OPEX) adicionales, pues el mantenimiento es similar al de las ventanas previas a la obra.

Por último, en lo referente a los parámetros financieros, dado que la inversión fue puramente equity (capital) y no deuda, se ha optado por calcular la WACC (Weighted Average Cost of Capital) considerando solo el coste del equity según el CAPM (Capital Asset Pricing Model). La fórmula de la WACC es:

$$WACC = \left(\frac{E}{E + D} \cdot K_E \right) + \left(\frac{D}{E + D} \cdot K_D \right)$$

Donde E representa el equity, D la deuda, K_E el coste del equity, y K_D el coste de la deuda. Al no haber deuda y considerando el método del CAPM se simplifica la expresión a:

$$WACC = K_E = R_f + \beta \cdot (R_m - R_f)$$

Donde R_f representa la tasa libre de riesgo, β la volatilidad del proyecto y R_m el retorno esperado del mercado, siendo $(R_m - R_f)$ el Equity Risk Premium (ERP) del proyecto.

Al tratarse de un proyecto doméstico con poca volatilidad y riesgo, se ha optado por una β de 0,5 al situarse la inversión notablemente por debajo de la media de sensibilidad del mercado. Por otro lado, para la R_f se ha considerado la rentabilidad del bono español a 30 años (riesgo bajo o nulo para similar horizonte de inversión) cuyo valor actual es de 3,65% según Investing.com [36]. Por último, la prima de retorno en proyectos del sector de la energía limpia se sitúa entre el 4 y el 7% según Fundeen [37], por lo que se ha estimado de 5,5%. Por lo tanto, la WACC aplicada al proyecto es del 4,58%.

Como se puede ver en el siguiente modelo, la inversión tiene una TIR del 4,1%, con un Valor Actual Neto (VAN) de -1.231,06€ en el año 0 (2022) para un horizonte de inversión 35 años, y un periodo de retorno de 20,69 años:

	2022	2023	2024	2025	2026	2027		2052	2053	2054	2055	2056	2057
Año	0	1	2	3	4	5	...	30	31	32	33	34	35
Inflación	1	1,02	1,05	1,07	1,10	1,12		1,98	2,03	2,08	2,12	2,17	2,22
"Ingresos" o ahorros													
Ahorro anual electricidad (kWh)		1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	...	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
Coste variable Plan Estable (€/kWh)		0,139	0,140	0,143	0,146	0,150	...	0,265	0,271	0,277	0,284	0,290	0,297
<i>Crecimiento coste variable electricidad</i>				2,3%	2,3%	2,3%	...	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
Ahorro tarifa variable elect. (€)		146	147	150	154	157	...	278	285	291	298	305	312
Ahorro impuesto electricidad 5,1%		7,4	7,5	7,7	7,8	8,0	...	14,2	14,5	14,9	15,2	15,5	15,9
Ahorro IVA 21%		32,1	32,4	33,1	33,9	34,7	...	61,4	62,8	64,3	65,8	67,3	68,8
Ahorro electricidad (€)		185	187	191	195	200	...	354	362	370	379	388	397
Ahorro anual gas (kWh)		8.250	8.250	8.250	8.250	8.250	...	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250
Coste variable CUR 3 (€/kWh)		0,040	0,046	0,047	0,048	0,050	...	0,088	0,090	0,092	0,094	0,096	0,098
<i>Crecimiento coste variable gas</i>				2,3%	2,3%	2,3%	...	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
Impuesto al gas (€/kWh)		0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	...	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Ahorro tarifa variable gas (€)		347	401	410	419	428	...	743	759	776	794	812	830
Ahorro IVA 21%		73	84	86	88	90	...	156	159	163	167	170	174
Ahorro gas (€)		420	485	496	507	518	...	899	919	939	961	982	1.004
Ahorro anual cambio de cerramientos		605	672	687	702	718	...	1.252	1.281	1.310	1.340	1.370	1.401
Deducción por subvenciones	1.000												
Costes													
CAPEX Obra	(17.620)						...						
EBITDA	(16.620)	605	672	687	702	718	...	1.252	1.281	1.310	1.340	1.370	1.401
D&A	(503)	(503)	(503)	(503)	(503)	(503)	...	(503)	(503)	(503)	(503)	(503)	(503)
EBIT	(16.620)	101	168	183	199	214	...	749	777	806	836	867	898
FCF	(16.620)	605	672	687	702	718	...	1.252	1.281	1.310	1.340	1.370	1.401

Tabla 9. Modelo económico intervención cambio de ventanas [Elaboración propia]

VAN (considerando WACC = 4,58%)	-1.231,06 €
TIR	4,1%
Payback	20,69 años

Figura 30. Parámetros económicos del modelo de cambio de ventanas [Elaboración propia]

En definitiva, si bien el modelo no presenta un excesivo atractivo financiero, se puede considerar como una intervención moderadamente rentable a lo largo de la vida útil del proyecto. En concreto, el periodo de retorno ronda los 20 años, siendo esto positivo si se tiene en cuenta el contexto de inversión en eficiencia energética en el hogar. Además, la TIR del 4,1% no está fuera de mercado para una inversión que, aun ofreciendo bajo retorno, presenta poco riesgo.

Por otro lado, el modelo no pondera intangibles como la mejora en la calidad de vida originada por el aislamiento acústico, el cual es significativo en una vivienda en el centro de Madrid, o la mejora en lo relativo a la estética de las nuevas ventanas; los cuales aportan valor añadido a la inversión.

Por último, el proyecto acarrea un impacto muy positivo en el compromiso con los ODS mediante la mejora de la eficiencia energética y la consiguiente reducción del consumo de energía y emisiones, beneficios que van al margen de la rentabilidad económica de una inversión de estas características.

Si se comparan los resultados con los estimados en otros proyectos como los presentados en el Estado del Arte de este documento, destaca la TIR del 10% y retorno en 10 años de L. Barandiarán [4] para un proyecto similar, aun teniendo en cuenta que su propuesta incluye la mejora de envolvente térmica además de la instalación de climalit, por su alto y rápido retorno que hace que el autor la considere como la medida de ahorro que “más sentido tiene”. En contraposición, D. García Cuenca [6] estima un retorno en 32 años con flujo de caja anual de 180,75€ y VAN a 10 años de -1770,16€ (con una WACC del 4%)

para un cambio de ventanas de 3.000€ de inversión, lo cual parece demasiado conservador y poco atractivo, desechando en consecuencia el autor la realización de la intervención.

En definitiva, la intervención realizada en la vivienda presenta un retorno moderado que, si bien puede ser mejorado en otros proyectos energéticos o no energéticos, ofrece otras ventajas significativas en términos de sostenibilidad y calidad de vida.

4.2 AUMENTO DE LA POTENCIA ELÉCTRICA CONTRATADA

El segundo cambio reciente en lo que a consumo energético se refiere es el aumento de la potencia contratada en julio de 2024. Por motivos de regulación y de consumo de la instalación, la suministradora (Iberdrola) demandó un aumento de la potencia contratada de 8,5kW a 12kW, lo que se tradujo en mayores costes mensuales y el pago extraordinario por el cambio de tarifa.

El objetivo de esta sección es determinar la potencia eléctrica contratada óptima del hogar en base a la lista de consumos elaborada en el *Capítulo 3.3: Análisis del consumo energético*, y con ello ver las implicaciones económicas y la adecuación de la intervención ya realizada.

De acuerdo con el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión [38], al tratarse de una vivienda con más de 160 m², además de contar con más de 30 tomas de luz, y estar prevista de aire acondicionado y secadora, se trata de un grado de electrificación elevado (Potencia prevista > 9200W a 230V). La potencia prevista es la capacidad máxima de la instalación, y se define por la capacidad del interruptor general automático (IGA). La potencia contratada puede ser inferior o igual a la prevista, pero no mayor.

Para el cálculo de la potencia prevista con el REBT, se considerarían entre otras cosas las tomas de luz y tomas de fuerza (enchufes) en la instalación, y se determinaría la potencia prevista que deberá ser de 9.200W (calibre IGA 40A), 11.500W (calibre IGA 50A) o 14.490W (calibre IGA 63A), siendo esta última la máxima para un suministro monofásico. Por lo tanto, en un consumo monofásico como el de la instalación en cuestión, la potencia

contratada podrá escogerse menor o igual a 14.490W, siempre que se disponga de un IGA de 63A.

El REBT no proporciona un método para calcular la potencia contratada óptima de la instalación, siendo esta aquella que evita que salte el ICP (consumo no excede potencia contratada en ningún momento) pero que no se sitúa demasiado por encima (no se derrocha capacidad, ahorro de coste).

No obstante, existen diversas aproximaciones para hacerlo. Un método sencillo y común es sumar todas las potencias de los consumos (potencia instalada de 31,83 kW, calculada en 3.2. *Listado de equipos*) y aplicar un coeficiente de simultaneidad, que según Naturgy [39] puede ser 0,2 para frecuencia de uso de electrodomésticos reducida y 0,3 para frecuencia elevada. Esto daría un intervalo de potencia contratada de 6,4 - 9,6 kW. Por último, sugieren añadir 1kW para equipos de uso esporádico, lo que resultaría en una potencia contratada de 7,4 - 10,6 kW.

Otra opción son las calculadoras online de potencia contratada como la de Iberdrola [40], las cuales a partir del tamaño de la vivienda y electrodomésticos en ella proporcionan un rango de potencia contratada estimado que, para el caso de la instalación en cuestión, es 6,9kW - 8kW.

Sin embargo, disponiendo de datos concretos sobre la instalación y el uso que se le da a cada consumo, así como la interacción entre estos, se ha considerado de mayor utilidad desarrollar un método específico para determinar la potencia contratada óptima en una instalación. El objetivo es crear un método preciso y replicable.

Para ello es importante explicar dos factores ya introducidos previamente: el factor de utilización y el factor de simultaneidad. El primero (K_u) pondera el grado de utilización de cada consumo, mientras que el segundo (K_s o C_s) pondera la no simultaneidad de todos los consumos de la instalación.

Primero se han estimado ambos factores para los distintos consumos. Para el factor de utilización, que se aplica individualmente a cada consumo, el reglamento recomienda usar

1 para circuitos de iluminación. Para otros consumos no especificados en el REBT, se ha optado por establecer el siguiente criterio:

- Aquellos consumos cuyo consumo es binario (no consumen nada o consumen la totalidad de su potencia de alimentación), como una televisión, la cafetera o la nevera, se ha optado por un coeficiente de utilización de 1.
- Aquellos consumos “graduales”, cuya potencia de alimentación depende del uso que se haga, como la placa de cocción, el horno, o la tostadora, se ha optado por un criterio razonable y conservador con un coeficiente de 0,8.
- Para las unidades de AC, con un elevado consumo pero que depende de las especificaciones de salida (temperatura objetivo, velocidad de salida, etc.), se ha establecido un factor de 0,7. Esto es debido a que el uso que se hace del aire es estándar, con velocidad de salida y temperatura moderadas.
- Por último, aquellos consumos con modos especiales, como el modo “Eco” (lavavajillas, lavadora, y plancha), se ha empleado un factor acorde a las especificaciones del fabricante (de 0,73 o 0,8). Balay estima en un 27% el ahorro que supone este modo en sus productos [41], bajando el consumo de 1,4 kWh a 1,02 kWh por ciclo para el caso del lavavajillas; mientras que Rowenta afirma un ahorro del 20% para su plancha [42].

Por otro lado, para los coeficientes de simultaneidad, se ha tenido en cuenta los patrones de comportamiento habituales de la vivienda, otra vez siguiendo un criterio conservador:

- Para aquellos consumos compuestos por un único equipo, cómo el lavavajillas, se ha aplicado un valor de 1.
- Para consumos que engloban varias cargas cuyo uso no es simultáneo, como los televisores, la iluminación, las placas de cocción o los dispositivos electrónicos, se ha establecido un coeficiente de 0,6.
- Para las unidades AC, que se ubican una en cada ala de la casa, se ha estimado un coeficiente de 0,7. A pesar de que se busque usarlas de forma alterna para

reducir el consumo, en momentos puntuales se activan simultáneamente para climatizar la vivienda por completo (e.g. al llegar a casa con temperatura muy elevada o por la noche en verano antes de acostarse).

Tras esto, se han agrupado los consumos en cinco circuitos en función de su comportamiento y uso:

- **Circuito “general” 0:** aquellos consumos que pueden conectarse en cualquier momento del día, sin importar el estado de otros consumos, como la iluminación, los televisores, la calefacción, etc.
- **Circuitos “especiales” 1 a 4:** circuitos que no funcionan nunca de manera simultánea por el comportamiento que se ha identificado en la vivienda. Por ejemplo, el circuito 1 está compuesto por lavavajillas, lavadora y plancha, que se activan en la misma franja horaria (por la mañana) pero nunca a la vez que el circuito 2 (placa de cocción y campana extractora). El resto de los circuitos son el 3 (horno) y el 4 (microondas, batidora, cafetera y tostadora), que también se activan de forma exclusiva.

De esta forma, empleando simultáneamente K_u y C_s para cada consumo, así como las restricciones de funcionamiento de cada circuito, se ha considerado que la potencia contratada necesaria será la general más la mayor de los circuitos complementarios.

El resultado de lo arriba descrito puede apreciarse en la siguiente tabla explicativa:

Circuito	Elemento	Potencia consumo (W)	Ku	Cs	Potencia estimada (W)	Potencia circuito (W)
General 0	Iluminación	1520,6	1	0,6	912,4	6261,3
	Neveras	235	1	1	235	
	Aspiradora	500	1	1	500	
	Televisores	414	1	0,6	248,4	
	Otros (móviles, ordenadores, etc.)	931	1	0,6	558,6	
	Caldera calefacción	101,7	1	1	101,7	
	Unidades AC	7561,7	0,7	0,7	3705,2	
Especial 1	Lavadora-secadora	2300	0,73	1	1679	5591
	Lavavajillas	2400	0,73	1	1752	
	Plancha de vapor	2700	0,8	1	2160	
Especial 2	Placa de cocción	4600	0,8	0,6	2208	2368
	Campana extractora	160	1	1	160	
Especial 3	Horno	3580	0,8	1	2864	2864
Especial 4	Microondas	1270	1	1	1270	1360
	Cafetera	1260	1	1	1260	
	Batidora	600	0,8	1	480	
	Tostadora	1700	0,8	1	1360	

Potencia contratada óptima (W):	11852,3
--	----------------

Tabla 10. Determinación de la potencia contratada óptima [Elaboración propia]

Como se puede apreciar, en función del comportamiento normal de la vivienda, se ha estimado una potencia necesaria de 11,85 kW. Por lo tanto, se confirma que el aumento de 8,5 a 12kW en julio de 2024 era necesario, como sugirió el proveedor de electricidad (Iberdrola). Esto se debe principalmente al alto consumo de las unidades AC en verano. Sin ellas, la potencia necesaria para la instalación sería significativamente menor (8 kW) e iría en consonancia con las estimaciones de potencia contratada más sencillas.

Además, cabe resaltar que podría haber alguna situación crítica de exceso en la potencia demandada en los meses de máximo consumo (verano, debido a las unidades AC) si se conectasen de manera simultánea al circuito general el especial crítico y algún otro consumo complementario.

En definitiva, la elevada potencia contratada necesaria en comparación con los métodos “simplificados” (12kW vs 8-10kW), y la elevada influencia del aire acondicionado

en esto, será motivo de estudio más adelante en el proyecto. Dado que las unidades AC condicionan en gran medida el consumo, se buscarán alternativas de menor consumo y/o configuraciones que reduzcan la demanda.

4.3 LECCIONES APRENDIDAS DE LAS INTERVENCIONES REALIZADAS

Esta sección busca sintetizar de manera clara las principales lecciones aprendidas en cuanto a las intervenciones ya realizadas en el pasado en materia de eficiencia energética.

Por un lado, el cambio de ventanas ha sido desde el punto de vista medioambiental y de sostenibilidad positivo, aportando una significativa reducción del consumo de energía y por ende de emisiones, cumpliendo con varios de los ODS en los que se enmarca este trabajo (*1.3. Alineación con Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)*).

En concreto, ha supuesto un ahorro del 17,5% en el consumo de electricidad y 31% en el consumo de gas, lo que ha reducido en un 27% las emisiones de CO₂ de la instalación. Esto también se ha traducido en un impacto positivo en la economía del usuario, con un *payback period* (periodo de retorno) de 20,47 años y una TIR del 4,1%. Si bien no son cifras excesivamente atractivas, son buenas para inversiones en el contexto del hogar, las cuales presentan bajo riesgo, pero largos periodos de retorno. Además, el cambio de ventanas ha supuesto mejoras en la calidad de vida de los usuarios (aislamiento acústico y menor diferencial térmico) así como en el diseño de la vivienda.

Es también importante ponderar que la inversión fue muy elevada por los requerimientos estéticos de la fachada (edificio antiguo) y los materiales solicitados (pino de oregón, Guardian select), lo cual reduce la rentabilidad y prolonga el retorno.

Por otro lado, tras el estudio de los consumos de la vivienda y la potencia demandada habitual, se ha evidenciado que el consumo con mayor impacto es el aire acondicionado. A pesar de que la vivienda (de electrificación elevada) tiene una potencia contratada estimada de 8-10 kW según métodos simplificados, el análisis detallado del consumo ha probado que

la demanda en verano puede rondar los 12 kW, haciendo necesario y correcto el aumento de la potencia contratada desde los 8,5 kW hasta los 12 kW.

Sin embargo, debido a que este fenómeno sucede pocas semanas (o días) al año, pero provoca un extra de costes fijos en la factura mensual durante todo el año (12,5 €/mes por 3,5kW instalados contando con el impuesto a la luz y el IVA), resulta de interés estudiar alternativas. En concreto, en este documento se analizarán opciones al respecto como reemplazar las unidades de AC por otras más nuevas y eficientes, dado que las actuales son del 2004, el cambio en los patrones de comportamiento ciertos días al año que condicionan el consumo, el uso de baterías para cubrir picos puntuales, o la configuración trifásica (en lugar de monofásica).

Capítulo 5. PROPUESTAS DE MEJORA A FUTURO

Analizados los principales problemas y desafíos del sector del consumo energético residencial, así como la situación actual de la instalación estudiada, esta sección tiene como objetivo proponer y definir exhaustivamente alternativas que contribuyan a una mejora de la eficiencia energética o reducción del consumo.

El capítulo 4, que pone en evidencia las ventajas de inversiones energéticas como el cambio de ventanas, con reducciones de hasta el 28% en el consumo energético anual, también expone una serie de oportunidades que la vivienda sigue ofreciendo en el contexto de la eficiencia energética.

Esta sección analizará los principales problemas y oportunidades de la instalación con el objetivo de definir las potenciales soluciones y evaluar las mismas desde un punto de vista técnico, medioambiental y económico.

5.1 JUSTIFICACIÓN DE LAS MEJORAS PROPUESTAS

De acuerdo con lo expuesto en el *Capítulo 3.* y *Capítulo 4.* , los principales problemas u oportunidades de mejora que la instalación presenta actualmente en términos energéticos son:

1) Nula presencia de generación renovable

La vivienda no cuenta con fuentes de generación renovable, ni ha contratado planes de suministro verde con las comercializadoras. Esto implica un mayor impacto medioambiental por el elevado factor de emisiones de CO₂ obtenido del mix. Además, según IRENA [43], las energías renovables ya son la forma más económica de generar electricidad, siendo la solar FV un 56% más barata que la generación fósil promedio en 2023.

Oportunidad: estudiar la viabilidad técnica, medioambiental y económica de incorporar un sistema de autoconsumo solar fotovoltaico.

2) Fuerte dependencia del aire acondicionado

El aire acondicionado representa el mayor consumo eléctrico de la instalación y condiciona la potencia contratada óptima, como se detalla en el *Capítulo 4.2*. Además, se trata de un equipo antiguo, fabricado en 2004, y con un mantenimiento insuficiente. Por lo tanto, su bajo rendimiento y alta demanda lo convierten en un candidato clave de estudio detallado.

Oportunidad: analizar opciones para reemplazarlo por un equipo más eficiente con mejor clasificación energética, así como el impacto del mantenimiento del equipo y otras alternativas de mayor eficiencia.

3) Elevado consumo de gas

A pesar del gran número de electrodomésticos y cargas presentes en la vivienda, anualmente se consumen 18.000 kWh de gas y 5.600 kWh de electricidad. Por ende, el gas supone el 76,3% de la energía consumida, debido principalmente a la caldera por calefacción y ACS. Aunque su consumo ya se redujo en un 31% gracias a la mejora de las ventanas, existe un margen para implementar soluciones aún más sostenibles. Además, este valor contrasta con lo observado en el *Capítulo 2. Estado de la Cuestión*, donde se observó que a nivel nacional el consumo de gas supone alrededor del 24% del consumo total residencial, teniendo en cuenta que este número se ve afectado por la ausencia de gas en multitud de viviendas.

Oportunidad: evaluar alternativas como el reemplazo de la caldera tradicional por una instalación de una bomba de calor (aerotermia), que permitan sustituir el sistema actual de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) reduciendo notablemente el impacto medioambiental.

4) Sobredimensionamiento de la potencia contratada

Como se desarrolló en el *Capítulo 4.2*, los hábitos y consumos actuales de la vivienda demandan 11,85kW de potencia contratada. Sin embargo, esta demanda crítica se alcanza solo en días puntuales, mientras que su coste fijo anual es significativo.

Oportunidad: analizar otras opciones que no impliquen una potencia contratada excesivamente elevada, como el almacenamiento de energía para cubrir picos de demanda o la conexión trifásica.

Este capítulo abordará la descripción técnica, impacto en el consumo y ambiental, y modelo económico de cada una de las oportunidades aquí descritas para poder determinar la viabilidad de cada una de ellas y obtener conclusiones de valor.

5.2 INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

Con el objetivo de minimizar el impacto ambiental de la instalación, pero también favorecer la economía de esta, este apartado estudiará la opción de realizar una instalación solar de autoconsumo en la vivienda.

5.2.1 DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Las instalaciones solares fotovoltaicas constan fundamentalmente de 3 componentes:

- **Módulos o paneles solares:** compuestos por celdas fotovoltaicas, captan la energía (luz) solar y generan una diferencia de potencial que induce una corriente (energía eléctrica). Se caracterizan por la potencia pico (Wp), potencia eléctrica que son capaces de suministrar en un instante. Existen varios tipos de panel en función del material, siendo los principales: monocristalino, policristalino, y amorfo.
- **Optimizador:** encargado de maximizar el rendimiento de los paneles. También conocido como MPPT (Maximum Power Point Tracker), puesto que induce a los paneles a trabajar en el punto de máxima potencia suministrada, mitigando posibles averías, sombras, o degradación en otros paneles.

- **Inversor:** encargado de transformar la corriente continua (DC) procedente de los paneles en corriente alterna (AC), dado que los consumos de la instalación funcionan con corriente alterna. También es importante para funciones de optimización y supervisión del funcionamiento de la instalación.

Además, pueden contar con los siguientes componentes:

- **Baterías:** fundamentales en instalaciones aisladas, almacenan energía (Wh) para dotar a la instalación de resiliencia puesto que la generación solar depende de factores externos (presencia de Sol, climatología, etc.).
- **Seguidores solares:** equipos que orientan la disposición de los paneles en función del movimiento del Sol con el objetivo de maximizar la irradiación solar y por ende la potencia eléctrica suministrada. En función de su complejidad, pueden ser de un solo eje o de dos ejes. Sin embargo, son más frecuentes en instalaciones de generación industriales que en autoconsumo.

Para el caso en cuestión, se ha optado por incluir en la instalación únicamente los paneles solares, optimizadores y equipo inversor. Los seguidores solares suponen un alto coste para una instalación de autoconsumo, lo que a priori podría minimizar el atractivo de la inversión. Por otro lado, este apartado busca evaluar la posibilidad de implantar una instalación fotovoltaica manteniendo el régimen de conexión a la red, es decir, no aislando la instalación. Por ello, el objetivo es el de cubrir parte de la demanda de manera renovable, motivo por el que incluir baterías no es necesario y podría influenciar los resultados notablemente (encarecimiento de la inversión). Además, las baterías serán analizadas en la sección 5.5. *Almacenamiento y conexión trifásica*.

Habrá que determinar los paneles necesarios (tipo de panel, modelo específico, cantidad y método de conexión), los optimizadores, y el inversor.

En lo relativo a los paneles solares, los paneles monocristalinos (formados por bloques entero de Silicio) son los más caros, pero también los de mayor vida útil y rendimiento. Por lo tanto, son aquellos que requieren una menor superficie para una misma

potencia suministrada. Dado que la instalación se encuentra en un edificio antiguo en el centro de una ciudad, la superficie es una restricción importante, por lo que se han seleccionado paneles monocristalinos.

Para elegir el modelo en cuestión es importante analizar eficiencia (generalmente entre 19 y 23%), garantía de producto o durabilidad, precio, resistencia al calor (pérdida de eficiencia por altas temperaturas), sostenibilidad (impacto de su fabricación) y garantía de rendimiento (degradación con la vida útil). Algunos de los principales fabricantes son SunPower, LG, JinkoSolar, REC, y Panasonic.

En base a los criterios anteriores, se ha seleccionado el SunPower Maxeon 6 AC, principalmente por su alta eficiencia (22,8%) y durabilidad (88% de eficiencia tras 40 años). Además, incorpora un inversor IQ 7 del fabricante Enphase integrado en serie, proporcionando salida en CA. El panel tiene una potencia nominal de 430W y unas dimensiones de 1032x1872 mm.

Además, los inversores de Enphase Energy son microinversores que optimizan cada panel de manera individual, mitigando efectos de sombras o averías y realizando las funciones del MPPT. Por lo tanto, el panel seleccionado engloba los tres componentes fundamentales descritos previamente. Se adjunta la ficha técnica en el *Anexo I*.

Para dimensionar la instalación FV se pueden seguir principalmente dos planteamientos. El primero de ellos, adecuado si la instalación dispone de almacenamiento, tiene en cuenta la energía necesaria a suministrar para cada día, y calcula el número de paneles con la siguiente fórmula:

$$n^{\circ} \text{ paneles} = \frac{\text{Energía necesaria}}{\eta \cdot P_N \cdot HSP}$$

Dónde:

- Energía necesaria representa la cantidad de energía que los paneles deben suministrar en un día. A pesar de que el consumo diario medio de la instalación es 15,3 kWh (5.600kWh entre 365 días), en meses estándar el consumo ronda los

13kWh/día y verano se sitúa en 30kWh/día, en línea con lo analizado en el *Capítulo 3*. Una generación diaria razonable a lo largo del año es de al menos 10 kWh.

- η representa el rendimiento de trabajo de los paneles, que contempla pérdidas por ensuciamiento y/o deterioro. Se va a considerar un 90% al suponer un alto mantenimiento.
- P_N representa la potencia nominal (pico) de los paneles, que para el modelo seleccionado es 430Wp.
- HSP (horas solar pico) representan la cantidad de energía solar disponible en un lugar determinado, medida como el equivalente en horas de irradiación solar máxima (1.000 W/m²) que incide sobre una superficie horizontal al día. Según Powen [44], en Madrid hay 5,74 HSP.

Con todo lo anterior, el número de paneles necesarios con almacenamiento es de:

$$n^{\circ} \text{ paneles} = \frac{10 \text{ kWh}}{0,9 \cdot 430 \text{ Wp} \cdot 5,74 \text{ h}} = 4,5 \rightarrow 5 \text{ paneles Sunpower Maxeon 6 AC}$$

El segundo método, adecuado para paneles sin almacenamiento, tiene en cuenta la potencia instantánea que se consume a lo largo del día, y dimensiona la instalación en base a esta, con el fin de aprovechar el máximo de la potencia generada a lo largo del día.

Observando los consumos diarios en meses estándar, considerados como caso base, la mayor parte del consumo tiene lugar entre las 10:00 y las 17:00, que es a su vez cuando hay mayor irradiación solar y tarifa pico. Durante estas horas se consumen entre 800 y 2.000 Wh por cada hora. En verano, esto aumenta a entre 1.000 y 5.000 Wh por hora, además de los ya analizados repuntes durante la noche. De este modo, la instalación se dimensionaría como:

$$n^{\circ} \text{ paneles} = \frac{800 \text{ W}}{0,9 \cdot 430 \text{ Wp}} = 2,07 \rightarrow 2 \text{ paneles Sunpower Maxeon 6 AC}$$

Por lo tanto, en línea con el planteamiento de no desaprovechar energía fotovoltaica a lo largo del día, se instalarán **2 paneles de 430 Wp** los cuales garantizan que la generación renovable sea consumida íntegramente por la instalación sin necesidad de almacenamiento. Dado que las dimensiones del panel seleccionado son de 1032x1872 mm, su superficie unitaria es de 1,93 m² y la instalación requerirá de 3,9 m².

5.2.2 IMPACTO EN EL CONSUMO Y MEDIOAMBIENTE

Esta sección cuantificará el impacto de la medida en términos energéticos y ambientales, sirviendo como punto intermedio del modelo de viabilidad económica.

Al dimensionar la instalación con 2 paneles de 430Wp, la instalación proporcionará al día 4,44 kWh de electricidad, considerando rendimiento y HSP, lo que se traduce en **1.622 kWh eléctricos anuales**. Al consumir la vivienda 5.600 kWh al año, esto supondría una generación renovable del 29%. Al haberse calculado previamente la potencia horaria mínima durante horas solares (10:00 a 17:00 horas) para días estándar (base), se puede asumir que toda la energía generada se consumirá en la instalación y no habrá vertido a la red. De este modo se tratará de una instalación de autoconsumo sin excedentes, ya que es preferible consumir que verter por ser el €/kWh vertido menor que el €/kWh consumido. Además, no será necesario incluir un contador bidireccional pero sí un mecanismo antivertido, tal y como regula el RD 244/2019 para instalaciones de autoconsumo.

Siguiendo las mismas hipótesis que en la sección 3.4. *Caracterización de la eficiencia energética*, el impacto medioambiental de este ahorro año a año es:

Consumo de energía primaria evitado = $1,75 \cdot \text{Ahorro energético} = 1,75 \cdot 1.622 \text{ kWh}$
= 2.838 kWh primarios

Emisiones de CO₂ evitadas = $0,241 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \cdot 2.838 \text{ kWh} = \mathbf{684 \text{ kg de CO}_2}$

Lo cual se traduce en una reducción del 28,7% de las emisiones por consumo eléctrico y del **9% de las emisiones totales** de la instalación actual.

5.2.3 MODELO ECONÓMICO

Para cuantificar el impacto económico de la medida, se ha considerado oportuno un horizonte de inversión de 25 años. Esto se debe a que, aunque el fabricante de los paneles garantiza una vida útil de al menos 40 años, los microinversores tienen una garantía de 25 años. Además, una menor duración implica menor incertidumbre en la volatilidad de los precios de la electricidad.

El principal retorno de la inversión es el ahorro en la factura de la electricidad, para el cual se han usado los datos de la sección 5.2.2, donde se ha calculado una reducción de la energía facturada del 29%, o lo que es lo mismo, 1.622 kWh/año. Esta será aportada directamente por la instalación fotovoltaica. No obstante, habrá que imputar un factor de reducción año a año por degradación de los paneles, disminuyendo el ahorro un 0,25% anual según el propio fabricante. También se incluirá como ingreso la deducción fiscal por subvenciones, al ser esta una medida alineada con los ODS y la eficiencia energética.

En cuanto a los costes, para la inversión inicial (CAPEX) se considerarán los paneles (que incluyen equipos inversores y optimizadores), el BOS (Balance of System: soportes, cableado, protecciones, interruptores, etc.), el mecanismo antivertido, la mano de obra para la instalación, y otros costes adicionales por tasas, permisos o certificaciones. También se incluirán gastos operativos (OPEX), representando estos el mantenimiento anual de los paneles.

El coste de los paneles es de 800€ (400€/panel), según proveedores del panel seleccionado en España, y para la mano de obra se considerará el coste de una jornada completa (8 horas) de 2 operarios con un salario de 40€/hora según Sunhero [45]. En cuanto al mecanismo antivertido, se ha seleccionado el vertido cero Kit Shelly de Tornasol Energy con coste de 90€ [46]. Por último, el BOS de una instalación fotovoltaica sin almacenamiento ronda el 15-20% del coste total, según instaladores como Autosolar [47].

En cuanto a la solicitud de licencias y permisos, según el RD 244/2019, al tratarse de una instalación de menos de 15 kW en suelo urbanizado y en baja tensión, no será necesario

solicitar permiso de acceso y conexión. No obstante, sí se requerirán licencias de obra, impuestos y tasas urbanísticas (como el Impuesto de Construcción y Obras o ICIO) además del certificado de fin de obra y la memoria del proyecto.

Para Madrid, el ICIO tiene un tipo impositivo del 3,75% sobre el valor total del proyecto (bonificable al 95%), y el coste de la memoria técnica o el certificado de fin de obra puede rondar los 125€ cada uno según técnicos como Energytec [48] o Grupo ECO I SOS [49] respectivamente. En total, y en línea con la estimación de la plataforma de construcción Habitissimo [50], legalizar una obra para una potencia menor a 10kW puede costar alrededor de 360€

La siguiente tabla recoge los distintos costes discutidos previamente:

Desglose CAPEX:

Componente	Cuantía (€)
Paneles	800
Mano de obra	640
BOS	400
Mecanismo antivertido	90
Tasas, licencias y permisos	360
Total	2.290 €

Tabla 11. Desglose CAPEX propuesta instalación FV [Elaboración propia]

Por último, para el OPEX se ha supuesto un importe de 150€/anuales siguiendo las estimaciones del instalador Enver [51].

Para el cálculo de la WACC del proyecto, esencial para el cálculo del Valor Actual Neto de la inversión, se ha seguido un criterio parecido al empleado en la sección 4.1.2 (rentabilidad cambio de ventanas). Puesto que la obra se financiaría exclusivamente con Equity, siguiendo el ejemplo de lo que se hizo en 2022 con las ventanas, la tasa de riesgo se ha calculado siguiendo el CAPM. No obstante, puesto que esta es una inversión de menor duración y mayor riesgo que el cambio de las ventanas, se han realizado las siguientes modificaciones:

- La volatilidad o β del proyecto, aun siendo baja, se ha aumentado de 0,5 (cambio de ventanas) a 0,7. Esto se debe a una mayor incertidumbre por la gran dependencia del retorno a la variación de los precios de la electricidad.
- El retorno medio del mercado (r_m) se ha aumentado de 5,5% a 7%, escogiendo el tramo superior del intervalo proporcionado por Fundeen [37]. Esto se debe a una mayor rentabilidad del tipo de proyecto en los últimos años, al ser la generación fotovoltaica más rentable requiriendo menor inversión inicial.

Por lo tanto, la WACC estimada del proyecto resulta de un 6%, en comparación con el 4,6% obtenido en el cambio de ventanas, y por tanto se espera de esta inversión un mayor retorno.

Con todo lo anterior, el modelo económico de la instalación solar fotovoltaica propuesta se puede apreciar en la siguiente tabla:

	2025	2026	2027	2028		2047	2048	2049	2050
Año	0	1	2	3	...	22	23	24	25
Inflación	1	1,02	1,05	1,07		1,65	1,69	1,73	1,77
"Ingresos" o ahorros									
Generación anual renovable FV (kWh)		1.622	1.618	1.614	...	1.539	1.535	1.531	1.527
Coste variable Plan Estable (€/kWh)	0,140	0,143	0,146	0,150	...	0,231	0,236	0,242	0,247
<i>Crecimiento coste variable electricidad</i>		<i>2,31%</i>	<i>2,31%</i>	<i>2,31%</i>	...	<i>2,31%</i>	<i>2,31%</i>	<i>2,31%</i>	<i>2,31%</i>
Ahorro tarifa variable elect. (€)		232	237	242	...	355	363	370	378
Ahorro impuesto electricidad (5,1%)		11,8	12,1	12,3	...	18,1	18,5	18,9	19,3
Ahorro IVA (21%)		51,2	52,2	53,3	...	78,5	80,1	81,7	83,4
Ahorro (€)		295	301	307	...	452	461	471	480
Deducción por subvenciones	458								
Costes									
CAPEX Obra	(2.290)								
OPEX Mantenimiento		(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)
EBITDA	(1.832)	145	151	157	...	302	311	321	330
D&A		(92)	(92)	(92)	...	(92)	(92)	(92)	(92)
EBIT	(1.832)	53	59	66	...	210	220	229	239
FCF	(1.832)	145	151	157	...	302	311	321	330

Tabla 12. Modelo económico base de la propuesta de instalación FV [Elaboración propia]

VAN (considerando WACC = 6%)	784,04 €
TIR	9,7%
Payback	10,45 años

Figura 31. Principales métricas financieras de la propuesta FV [Elaboración propia]

Como se puede observar, el modelo arroja una TIR del 9,7% con un *payback period* de 10,45 años. Además, para la WACC estimada del 6%, el VAN del proyecto es positivo y de 784€. Por lo tanto, es una inversión que resulta atractiva no solo desde el punto de vista energético y ambiental (reducción de un 9% de las emisiones totales), sino que también aporta rentabilidad y un corto periodo de recuperación de la inversión.

Los números estimados en esta sección son coherentes y van en línea con las tendencias del mercado. Según un estudio de BloombergNEF y Schneider Electric [52] la solar FV de autoconsumo cuenta con un *payback* de alrededor de 7 años y una TIR de alrededor del 17%. Además, otros especialistas del autoconsumo como OTOVO afirman que una instalación de autoconsumo sin batería puede llegar a proporcionar el 40-50% del consumo [53].

Los números obtenidos son ligeramente “peores” (10,5 años; 9,7% y 30% de autoconsumo) debido principalmente a que se ha seguido un criterio conservador. El objetivo ha sido asegurar que la totalidad de la generación sea útil, instalando tan solo dos paneles. Si se pusiese un tercer panel, y bajo las mismas hipótesis, la TIR resultante es del 17,8% con *payback* de 6,5 años y contribuyendo a un 43% de la generación, muy en línea con las tendencias de mercado, pero con una mayor incertidumbre.

Por otro lado, se ha decidido realizar un análisis de sensibilidad, parecido al que se realizará en varias de las secciones posteriores de este capítulo, para tener en cuenta la variabilidad de las hipótesis con mayor volatilidad. En este caso, se ha considerado que el

aumento en el precio de la electricidad es la variable de mayor incertidumbre. Este parte del caso base neutro (electricidad sube como la inflación a 2,3% anual), y considera un caso alcista hasta 4% (electricidad sube más que inflación por posibles tensiones geopolíticas, aranceles, o congestiones de red de transporte) y otro bajista hasta -1% (electricidad sube menos que la inflación por inclusión de renovables en el mix energético y disminución de costes de generación / LCOE). El intervalo es asimétrico puesto que se ha considerado más probable el caso bajista que el alcista.

Se ha complementado la matriz con variabilidad en el OPEX, puesto que si se hace un menor mantenimiento (in-house o más esporádico) los costes anuales podrían reducirse, o también podrían encarecerse con el paso del tiempo (mayor demanda nacional).

Los resultados se pueden ver a continuación:

		Crecimiento anual precio electricidad (%)					
		9,7%	-1,0%	1,0%	2,3%	3,0%	4,0%
Costes OPEX anuales (€)	100	7,0%	10,4%	12,4%	13,4%	14,9%	
	125	4,9%	8,8%	11,1%	12,1%	13,7%	
	150	2,6%	7,2%	9,7%	10,8%	12,5%	
	175	-0,2%	5,6%	8,3%	9,5%	11,3%	
	200	-4,3%	3,8%	6,9%	8,2%	10,2%	

Tabla 13. Análisis de sensibilidad instalación FV [Elaboración propia]

En definitiva, es una medida que para la mayoría de los escenarios futuros contemplados presenta una rentabilidad atractiva (TIR mayor del 6-7%), pero que podría verse afectada en el caso de una reducción en el precio de la electricidad. Si tuviese lugar el caso bajista (-1% anual los próximos 25 años), la TIR máxima sería del 7% aún con el menor mantenimiento.

En paralelo, de manera certera es una opción útil para cumplir el objetivo de generación renovable, aportando el 30% de la demanda aún bajo un criterio conservador.

5.3 ANÁLISIS DEL AIRE ACONDICIONADO

En lo relativo al aire acondicionado, el principal problema encontrado es su elevado consumo, que lo convierte en la carga eléctrica más influyente de la instalación y que además condiciona la elevada potencia contratada de la vivienda. Por lo tanto, en esta sección se analizarán tres alternativas al problema en cuestión, cuantificando su impacto en el consumo, ambiental y económico.

5.3.1 SUSTITUCIÓN DE LOS EQUIPOS ACTUALES

Esta primera alternativa consiste en reemplazar los dos equipos actuales de aire acondicionado por nuevos equipos. Se basa en la antigüedad de los equipos actuales, fabricados en 2004, y en los avances tecnológicos de las últimas décadas. No obstante, su gran desventaja es el requerimiento de una elevada inversión inicial, lo que podría conllevar largos periodos de retorno, pero a su vez un potencial mayor impacto en el consumo.

Descripción técnica

Las unidades de aire acondicionado regulan la temperatura, humedad y calidad del aire interior. Se clasifican por su diseño (principalmente split, multisplit, por conductos, o portátiles), capacidad (BTU o kW), funcionalidad (aire acondicionado o bomba de calor), y tecnología (inverter o tradicional). Al elegir las, se debe considerar el tamaño del espacio, eficiencia energética (EER/COP), nivel de ruido, tipo de refrigerante (como R32) y funciones adicionales, priorizando eficiencia y sostenibilidad.

Los diseños de aire acondicionado hacen referencia a la disposición de las unidades interior y/o exterior. Por ejemplo, los portátiles no disponen de unidad exterior y sirven para climatizar una única sala. Por otro lado, los de tipo Split se componen de una unidad interior y otra exterior, siendo adecuados para climatizar una sala también, pero con mayor capacidad. Sin embargo, los Multisplit disponen de varias unidades interiores, siendo

óptimos para varias salas o una vivienda. Por último, los de conductos emplean conductos alojados en un falso techo para distribuir el aire por toda la instalación mediante rejillas, con menor impacto visual y mayor confort.

En cuanto a las tecnologías, hacen referencia al funcionamiento del compresor que alberga. La tradicional emplea ciclos de apagado/encendido en el compresor reiteradamente en función de la temperatura real y objetivo de la sala. En su lugar, la de tipo Inverter regula la frecuencia o velocidad del compresor, haciéndolo funcionar de manera constante. De este modo se logra mantener una temperatura constante en la sala, así como aumentar la eficiencia al evitar consumos innecesarios y prolongar la vida útil del compresor.

Por último, las unidades de AC pueden tener dos funcionalidades principales. Las tradicionales son de tipo AC únicamente, y solo pueden enfriar el ambiente. El caso contrario es el de las bombas de calor, que pueden aportar tanto refrigeración como calefacción. Estas a su vez pueden ser aire-aire (si obtienen calor del aire ambiente y calientan/enfrían el aire interior directamente) o aire-agua (si climatizan un circuito secundario de agua).

Actualmente, la vivienda cuenta con unidades de aire acondicionado por conductos con tecnología Inverter y funcionalidad de bomba de calor aire-aire, aunque solo se utilizan para refrigeración (dado que la caldera de gas se ocupa de la calefacción). En este capítulo se planteará reemplazarlas por unidades de bomba de calor más eficientes, que aporten flexibilidad y se adapten al futuro energético. Dado el aumento en el precio del gas, la tendencia hacia la descarbonización y las mayores eficiencias de las bombas de calor frente al gas, esta opción es más coherente a largo plazo, pese a un mayor coste inicial.

Dimensionamiento y diseño de la instalación

Las unidades AC actuales tiene una potencia de refrigeración de 26,5 kW (12,5 + 14 kW) y un consumo monofásico de 7,56 kW. Emplean el refrigerante R410A, cuyo Potencial de Calentamiento Global (GWP) es de 2.088, superando ampliamente el límite de 750 establecido por el reglamento F-Gas de la UE, lo que conllevará su prohibición a partir de enero de 2025. Además, los equipos generan niveles de ruido de en torno a 45-50 dB.

Por estos motivos, se priorizará la sustitución por un modelo más eficiente, con menor consumo y ruido, que utilice un refrigerante de menor impacto ambiental, como el R32 (GWP = 675), pero manteniendo las mismas prestaciones térmicas.

Entre los principales fabricantes de aire acondicionado con bomba de calor aire-aire y tecnología Inverter para sistemas por conductos destacan Mitsubishi Electric, Daikin, Fujitsu, LG y Hitachi. Tras evaluar eficiencia, durabilidad y coste, se ha optado por las soluciones de Mitsubishi, especialmente por el buen rendimiento del equipo a reemplazar y por la compatibilidad de la instalación. En concreto, se ha seleccionado el modelo Power inverter PUZ-ZM100VKA.

Debido a la mejora en las ventanas en 2022, el consumo eléctrico en verano se ha reducido aproximadamente un 20-30%. Esto permite una disminución en la potencia de refrigeración, dado que se dimensionó para una vivienda con condiciones desfavorables. Aunque se podría optar por un único equipo de alrededor de 20 kW, se ha decidido mantener dos circuitos de refrigeración (uno para cada ala de la vivienda) para no afectar al confort. Se ha optado por dos unidades PUZ-ZM100VKA, cada una con 9,5 kW de potencia de refrigeración (11,2 kW en calefacción), refrigerante R32 y niveles de ruido de 41-49 dB. La nueva potencia eléctrica de alimentación será de 4,8 kW (2,4 kW cada unidad), gracias a las mejoras en eficiencia (EER), el uso de refrigerantes más eficientes (R-32) y tecnología avanzada. La ficha técnica completa se encuentra en el *Anexo II*.

Esta propuesta está alineada con los objetivos del proyecto por la mayor eficiencia y mejores prestaciones que facilitan mejoras ambientales, económicas, y de confort para el usuario. El coste unitario es de 2.263€ según el vendedor KeroClima, y la reducción en la potencia de alimentación AC es de 2,76 kW (37% respecto a las unidades actuales).

El nuevo equipo tendrá un impacto positivo en la instalación en forma de menor potencia contratada y menor consumo de electricidad; lo que redundará en menores emisiones de CO₂ y coste de las facturas de electricidad.

Impacto en el consumo y medioambiente

En cuanto al consumo energético y la reducción de emisiones, la incorporación de equipos más modernos y eficientes permitirá una disminución significativa del gasto energético. Las mejoras en eficiencia (hasta A++), junto con el diseño optimizado de los ventiladores, intercambiadores y compresor, contribuyen a esta reducción.

Uno de los factores clave es el Energy Efficiency Ratio (EER), que mide la eficiencia ($E_{\text{térmica_salida}} / E_{\text{eléctrica_entrada}}$) en refrigeración, de igual modo que hace el COP en calefacción. Mientras que los equipos actuales presentan un EER de 3,8 y 3,4 respectivamente, los nuevos equipos seleccionados alcanzan un EER de 3,95, lo que representa una mejora sustancial en el rendimiento (entre 5 y 20% de manera teórica).

Adicionalmente, considerando que los equipos nuevos operan en condiciones óptimas, a diferencia de la degradación tras más de 20 años de uso de los equipos actuales, hay que considerar una reducción adicional en el consumo del 25% según el propio Mitsubishi [54]. Teniendo en cuenta ambos factores, se estima que el consumo eléctrico se reducirá entre un 20 y un 60%, siendo el caso base de 40% y logrando así una mejora significativa en eficiencia y sostenibilidad.

Por lo tanto, para cuantificar el impacto es necesario estimar el consumo anual de las unidades AC. Para ello se han considerado los meses de verano (junio a septiembre) y se ha calculado el exceso de consumo respecto al resto de meses estándar. Empleando los números de la sección 3.3.1. *Consumo de electricidad*, el consumo en los meses de verano (junio a septiembre) es de 2.400kWh (un 43% del total anual). Teniendo en cuenta los consumos estándar durante el año del resto de equipos (electrodomésticos, iluminación, etc.) de 430kW/mes y el mes de inhabitabilidad parcial de la vivienda en agosto (3 de 4 semanas inhabitada), en ese periodo el consumo estándar sería de en torno a 1.400 kWh. Por lo tanto, el consumo atribuido al aire se puede estimar en 1.000 kWh anuales (18% del consumo total). Por ende, el **ahorro anual base** en el consumo por esta iniciativa es de **400 kWh** (40% de ahorro en el consumo del AC), lo que implica un ahorro del 7% sobre el consumo

de electricidad total. Además, para el modelo se ha supuesto un pequeño deterioro de las unidades que provoque un menor ahorro según avancen los años.

Y en cuanto a las emisiones, siguiendo los razonamientos ya descritos anteriormente en este documento, el ahorro de energía primaria es de 700 kWh y esto supone unas emisiones evitadas de **169 kg de CO₂** (2,2% sobre las emisiones totales de la vivienda).

Modelo económico

En el ámbito económico, aplicando el mismo racional y coeficientes que en la *Tabla 10*, pero actualizando la alimentación de los nuevos ACs, la potencia contratada óptima de la instalación pasará de 11,8 kW (12 kW contratados) a alrededor de 10,5 kW (10,5 kW contratados). Esto se traduce en un ahorro fijo mensual de la factura de 4,2€ (0,08754 €/kW/día contratado en pico y 0,003491 €/kW/día en valle según lo visto en 3.3.1), o 50,8€ anuales. Adicionalmente, la reducción en el consumo eléctrico (kWh) del equipo también repercutirá a la parte variable de la factura (0,139785€/kWh), y a todo lo anterior habrá que sumar impuesto a la luz (5,1%) e IVA (21%).

Para los gastos, se ha considerado el CAPEX propio de los equipos y su instalación, pero no el mantenimiento (anual o bianual) puesto que este se debería realizar de igual forma al equipo actual.

En cuanto al cálculo de la WACC, al tratarse de una propuesta con bajo riesgo se ha estimado una beta de 0,6 y R_m de 5,5%, resultando un coste de capital del 4,76% ligeramente superior al 4,58% del cambio de ventanas. Esto es coherente puesto que se considera que esta iniciativa tiene una variabilidad y riesgo ligeramente superior.

El horizonte de inversión se ha considerado de 25 años, puesto que según el fabricante los nuevos equipos tienen una vida útil de entre 15 y 20 años, a diferencia de los 10 años de los equipos actuales, pero a la vez solo se usarán para refrigeración durante 3-4 meses al año, y no durante todo el año, minimizando así la degradación.

Por lo tanto, considerando los gastos y ahorros mencionados, el modelo económico de la propuesta es el siguiente:

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Inflación	1	1,02	1,05	1,07	1,10	1,12	1,15	1,17	1,20	1,23	1,26	1,29	1,32	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,51	1,54	1,58	1,62	1,65	1,69	1,73	1,77	
"Ingresos" o ahorros																											
Ahorro anual variable consumo electricidad (kWh)	400	399	398	397	396	395	394	393	392	391	390	389	388	387	386	385	384	383	382	381	380	380	379	378	377		
Coste variable Plan Estable (€/kWh)	0,140	0,143	0,146	0,150	0,153	0,157	0,160	0,164	0,168	0,172	0,176	0,180	0,184	0,188	0,192	0,197	0,201	0,206	0,211	0,216	0,221	0,226	0,231	0,236	0,242	0,247	
Crecimiento coste variable electricidad		2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	
Ahorro tarifa variable elect. (€)		57	58	60	61	62	63	65	66	67	69	70	72	73	75	76	78	79	81	82	84	86	88	89	91	93	
Ahorro tarifa fija elect. (€)		51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	
Ahorro impuesto electricidad (5,1%)		5,5	5,6	5,6	5,7	5,8	5,8	5,9	6,0	6,0	6,1	6,2	6,2	6,3	6,4	6,5	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7,0	7,1	7,2	7,2	7,3	
Ahorro IVA (21%)		23,8	24,1	24,4	24,6	24,9	25,2	25,5	25,8	26,1	26,4	26,7	27,0	27,3	27,6	28,0	28,3	28,7	29,0	29,4	29,8	30,2	30,6	31,0	31,4	31,8	
Ahorro (€)		137	139	140	142	143	145	147	148	150	152	154	156	157	159	161	163	165	167	169	172	174	176	178	181	183	
Deducción por subvenciones	904																										
Costes																											
CAPEX	(4.520)																										
EBITDA	(3.616)	137	139	140	142	143	145	147	148	150	152	154	156	157	159	161	163	165	167	169	172	174	176	178	181	183	
D&A		(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	(181)	
EBIT	(3.616)	(43)	(42)	(40)	(39)	(37)	(36)	(34)	(32)	(31)	(29)	(27)	(25)	(23)	(21)	(20)	(18)	(16)	(13)	(11)	(9)	(7)	(5)	(2)	(0)	2	
FCF	(3.616)	137	139	140	142	143	145	147	148	150	152	154	156	157	159	161	163	165	167	169	172	174	176	178	181	183	

Tabla 14. Modelo económico base de la sustitución de unidades exteriores AC [Elaboración propia]

Como se puede observar, para el caso base se obtiene una TIR del 0,7% y un VAN negativo para la WACC estimada, lo cual indica que la inversión no es rentable (a ese coste del capital). No obstante, hay que tener en cuenta el gran deterioro de los equipos actuales y la necesidad de cambiarlos en los próximos años por motivos de regulación y posible fin de la vida útil (avería). Además, esta medida supone una gran reducción de las emisiones y el consumo.

VAN (considerando WACC = 4,76%)	-1.622,15 €
TIR	0,7%
Payback	23,11 años

Figura 32. Principales métricas económicas cambio unidades AC [Elaboración propia]

En paralelo se ha realizado un análisis de sensibilidad variando la reducción en el consumo de electricidad en el intervalo estimado (20 a 60%) así como la volatilidad en el precio de la electricidad (0,5 a 4%). Esta volatilidad es similar a la de la sección 5.2.3, y contempla los casos alcista y bajista del precio de la electricidad. El resultado se puede ver en la siguiente tabla:

		Volatilidad precio electricidad (€)				
	0,7%	0,5%	1,5%	2,3%	3,0%	4,0%
Reducción consumo (%)	20%	-2,6%	-2,2%	-1,9%	-1,6%	-1,1%
	30%	-1,4%	-0,9%	-0,5%	-0,2%	0,4%
	40%	-0,3%	0,2%	0,7%	1,1%	1,7%
	50%	0,6%	1,2%	1,7%	2,2%	2,9%
	60%	1,5%	2,2%	2,7%	3,2%	4,0%

Tabla 15. Matriz de sensibilidad sustitución unidades AC [Elaboración propia]

Como se puede observar, la TIR es positiva en toda la franja “optimista” pero no resulta notablemente rentable en ningún escenario de variación de precios y ahorro en el consumo (TIR máxima de 4%). Además, en caso de tener lugar el escenario bajista en los precios de la electricidad, la rentabilidad podría rondar valores negativos (-2%).

En definitiva, se trata de una medida que no ofrece una especial rentabilidad, pero resulta necesaria de cara a eficientar la vivienda, evitar problemas técnicos y contribuir con las mejoras ambientales presentadas como motivación de este proyecto.

5.3.2 OPTIMIZACIÓN DE LOS EQUIPOS ACTUALES

La segunda alternativa se basa en optimizar los equipos actuales mediante mantenimiento y limpieza. Esta medida supone un menor coste inicial que la sustitución, pero a su vez un menor impacto potencial tanto en términos ambientales como económicos.

Los equipos actuales, fabricados en 2004, tienen 21 años de uso y sólo han sido objeto de mantenimiento en dos ocasiones durante los últimos 7 años (desde la compra de la vivienda). Según el fabricante, los modelos PUAZ-RP5VHA y PUAZ-RP6VHA tienen una vida útil de en torno a 10 años. Sin embargo, al emplearse los equipos exclusivamente durante verano para refrigeración puede suponerse una mayor vida útil (en torno a 20 años), evidenciando así la crítica condición actual de los equipos y la importancia de un mantenimiento eficaz, dado que este afecta considerablemente tanto a la vida útil como al consumo.

El correcto mantenimiento se basa en una serie de medidas de comprobación y limpieza como:

- Limpieza de filtros
- Revisión del nivel de refrigerante
- Limpieza de batería exterior
- Lubricación de motores y ventiladores
- Limpieza de rejillas
- Chequeo y limpieza general de componentes

Según Enel [55], este se debe realizar al menos 1 vez al año de manera general pero idealmente 2 veces al año para equipos inverter, como es el caso. Para la propuesta aquí analizada se va a suponer un único mantenimiento anual al usarse los equipos sólo durante 3-4 meses al año. En cuanto al coste, Cronoshare [56] proporciona un rango medio nacional de 60-200 €/mantenimiento y, considerando la alta capacidad y antigüedad de los equipos, se ha supuesto un encarecimiento de hasta 150€/mantenimiento como caso base.

En cuanto al impacto del mantenimiento, según los números proporcionados por Mitsubishi [54], se estimará como caso base una reducción del consumo de las unidades AC del 25%.

Replicando el análisis de la sección 5.3.1. *Sustitución de los equipos actuales* con los datos de la sección 3.3.1. *Consumo de electricidad*, el consumo atribuido al aire se puede estimar en 1.000 kWh anuales. Por lo tanto, el **ahorro por mantenimiento** se traduciría en **250kWh anuales** (4,4% del consumo eléctrico) y esto tendría un impacto ambiental de **106kg de CO₂ no liberado** al año (1,4% de las emisiones totales).

Para el análisis económico se ha establecido un horizonte a corto plazo de 10 años, considerando que las unidades tienen 21 años de uso y existe una probabilidad significativa de que requieran reemplazo en el corto o medio plazo.

Aunque la principal métrica de rentabilidad de esta inversión será el flujo de caja libre generado (FCF) año a año, se determinará el VAN para ponderar la inversión de manera global en el año cero. Para la WACC de esta inversión solo se tendrá en cuenta la inflación (2,31%), puesto que esta propuesta no requiere de inversión inicial, posee bajo riesgo y se puede re-evaluar año a año.

Con todo lo anterior, el impacto económico de realizar mantenimiento preventivo anual se puede ver desglosado en la siguiente tabla:

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inflación	1	1,02	1,05	1,07	1,10	1,12	1,15	1,17	1,20	1,23	1,26
"Ingresos" o ahorros											
Ahorro anual consumo electricidad (kWh)		250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Coste variable Plan Estable (€/kWh)	0,140	0,143	0,146	0,150	0,153	0,157	0,160	0,164	0,168	0,172	0,175
<i>Crecimiento coste variable electricidad</i>		2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
Ahorro tarifa variable elect. (€)		36	37	37	38	39	40	41	42	43	44
Ahorro impuesto electricidad (5,1%)		1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2
Ahorro IVA (21%)		7,9	8,1	8,3	8,4	8,6	8,8	9,0	9,3	9,5	9,7
Ahorro (€)		45	47	48	49	50	51	52	53	55	56
Costes											
OPEX Mantenimiento		(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)	(150)
EBITDA	0	(105)	(103)	(102)	(101)	(100)	(99)	(98)	(97)	(95)	(94)
D&A		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EBIT	0	(105)	(103)	(102)	(101)	(100)	(99)	(98)	(97)	(95)	(94)
FCF	0	(105)	(103)	(102)	(101)	(100)	(99)	(98)	(97)	(95)	(94)

Tabla 16. Modelo económico base del mantenimiento del AC [Elaboración propia]

Como se puede ver, para el caso base la propuesta cuenta con flujos de caja libres (FCF) anuales de en torno a -100€. Esto se debe al OPEX base de 150€ y el potencial ahorro de 50€. De este modo, el VAN del proyecto resulta en -862€ y no sale rentable puesto que el coste del mantenimiento es notablemente superior al ahorro proporcionado en términos energéticos.

No obstante, se ha considerado importante ponderar la alta variabilidad de las hipótesis planteadas en cuanto a coste del mantenimiento y ahorro en el consumo por equipos bien mantenidos. Con todo ello se ha planteado una matriz de sensibilidad replicando el modelo de la *Tabla 16*. Para el coste de cada mantenimiento se considera la horquilla 50€ a 250€ en intervalos de 50€ [50, 100, 150, 200, 250], teniendo en cuenta también que se tratará de mantenimientos anuales siempre. En cuanto al ahorro en el consumo, se considerará el intervalo 5% a 45% en intervalos de 10% [5, 15, 25, 35, 45], siguiendo las distintas horquillas proporcionadas por distintos institutos y recogidas en el artículo de Synecore [57].

El resultado se puede ver a continuación:

		Coste de cada mantenimiento (€)					
		-862 €	50	100	150	200	250
Ahorro energético (%)	5%	(345)	(777)	(1.209)	(1.641)	(2.073)	
	15%	(171)	(603)	(1.035)	(1.467)	(1.899)	
	25%	2	(430)	(862)	(1.294)	(1.726)	
	35%	176	(256)	(688)	(1.120)	(1.552)	
	45%	350	(82)	(514)	(946)	(1.378)	

Tabla 17. Matriz de sensibilidad mantenimiento de unidades AC [Elaboración propia]

Por lo tanto, como se puede ver en la tabla, se trata de una medida que en términos económicos no es rentable. Sólo presenta VAN positivo rentable en el caso más favorable, suponiendo mantenimientos de 50€ que generen un ahorro energético del 25 - 45% anual.

Sin embargo, el modelo no considera la degradación evitada en los años futuros gracias al mantenimiento, lo que provocaría un mayor consumo; ni la desinversión evitada en el año cero al prolongar la vida útil de los equipos.

En definitiva, esta inversión se puede considerar positiva desde el punto de vista ambiental, evitando en el caso base la emisión de 106kg de CO₂. También resulta atractiva la inversión desde el punto de vista de la prolongación de la vida útil de las unidades, puesto que el mantenimiento podría evitar un coste notablemente mayor en el corto plazo, como el visto en la sustitución (5.3.1).

5.3.3 NUEVO MODELO: RENTING

La tercera y última opción por considerar para mejorar las unidades de aire acondicionado, con el objetivo principal de reducir el consumo eléctrico y ofrecer una solución más económica, es el modelo emergente de renting aplicado al AC.

Este enfoque consiste en desmontar las unidades actuales y contratar un servicio de suscripción que permita alquilar equipos nuevos con mantenimiento incluido. De este modo, en lugar de realizar una inversión inicial elevada en la compra de nuevas unidades, se pagaría una cuota mensual, trimestral o anual por el uso de equipos a priori más eficientes.

Las principales ventajas de esta opción son:

- Reducción en el consumo y las emisiones gracias a la mayor eficiencia de los equipos.
- Externalización del mantenimiento, lo que elimina costes y responsabilidades para el usuario.
- Flexibilidad, al permitir adaptar o cambiar los equipos según necesidades.
- Eliminación del CAPEX inicial, que en el caso de la compra de equipos nuevos puede suponer una inversión significativa, como se ha analizado en la sección 5.3.1.

Sin embargo, este modelo también presenta algunos inconvenientes:

- A largo plazo, el alquiler puede resultar más costoso que la compra.
- La cuota de renting (y la rentabilidad del modelo) podría verse afectada por la volatilidad del precio de la electricidad o por cláusulas estipuladas en el contrato.

Para la cuantificación del ahorro en el consumo y la reducción de emisiones asociados a esta propuesta, es razonable suponer números similares a los vistos en la sección 5.3.1.

Actualmente, empresas como Daikin Rental Solutions, InoRent y Johnson Controls ofrecen este modelo de negocio, aunque enfocado principalmente en el sector industrial (oficinas, naves, eventos). Por tanto, se trata de una opción que aún no está implantada en el sector residencial en España y, en consecuencia, no es viable para esta instalación en este momento. No obstante, se ha considerado relevante incluirla en este análisis para una posible reevaluación energética futura de la vivienda.

5.4 ALTERNATIVA A LA CALDERA DE GAS: AEROTERMIA

En lo relativo al problema por el elevado consumo y dependencia del gas en el mix energético de la vivienda, con los efectos ambientales y económicos que esto conlleva, esta sección analizará el potencial reemplazo de la caldera de gas por una aerotermia que aproveche los radiadores actuales. Se trata de una bomba de calor que, al reutilizar los actuales radiadores de aluminio, evite la complejidad (y mayor coste) de levantar el suelo de microcemento.

5.4.1 DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Las bombas de calor de aerotermia funcionan mediante un ciclo termodinámico que extrae energía del aire exterior para convertirla en calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS). Este proceso involucra un compresor, una válvula de expansión, un refrigerante y dos intercambiadores de calor, organizados en dos circuitos diferenciados: uno de refrigerante y otro hidráulico interno.

Ventajas: Alta eficiencia energética, reducción de emisiones contaminantes, bajo mantenimiento y funcionamiento silencioso.

Desventajas: Inversión inicial elevada y menor rendimiento en climas extremadamente fríos (no relevante para este caso).

A continuación, se desarrollan con mayor detalle las cuatro fases del proceso junto a un gráfico explicativo:

- Evaporación: el refrigerante líquido absorbe (o cede) calor del exterior, reduciendo su presión y temperatura hasta evaporarse (o al contrario si refrigera).
- Compresión: se comprime el refrigerante en estado gaseoso aumentando su presión y temperatura.
- Condensación: el refrigerante, en estado gaseoso, cede su calor al agua en un intercambiador de calor y vuelve a estado líquido. En caso de refrigerar, el refrigerante absorbe calor del ciclo de agua.
- Expansión: en la válvula de expansión se expande el refrigerante líquido reduciendo notablemente su presión y temperatura.

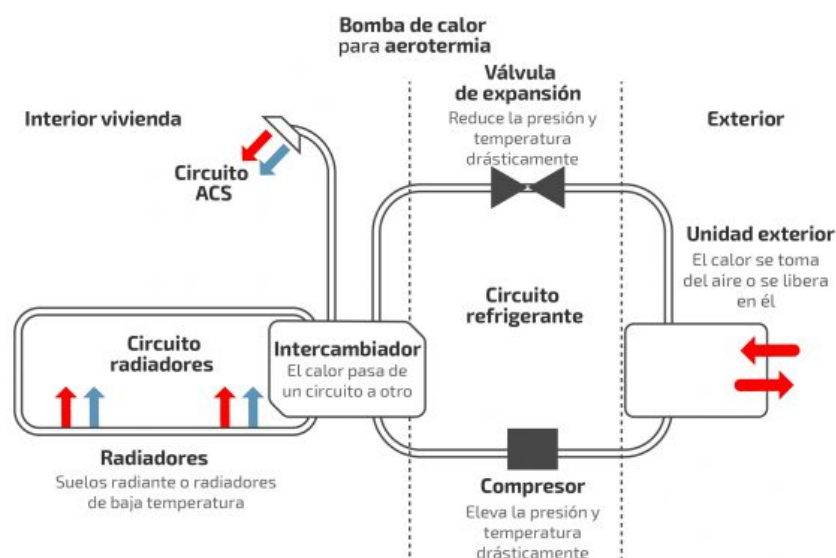


Figura 33. Funcionamiento de la aerotermia [58]

Estos sistemas pueden clasificarse de varias maneras. La primera de ellas es si se trata de sistemas aire-aire o aire-agua, como sucedía con las unidades AC (bombas de calor también). Los primeros toman o ceden calor del aire exterior para transmitirlo directamente al aire ambiente del interior. Los segundos se diferencian en que la transmisión de calor sucede mediante un circuito interno de agua por tuberías o radiadores. Por lo tanto, en el caso de la instalación propuesta, se tratará de un sistema aire-agua.

A su vez, en función del número de unidades interiores y exteriores, se pueden clasificar por monobloc o bibloc. Las primeras agrupan evaporador y condensador en un único equipo exterior, mientras que las segundas tienen dos equipos independientes, uno interior y otro exterior.

5.4.2 DIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

La actual caldera de gas tiene potencia de salida de 35 kW, con 30 - 32,8 kW para calefacción y 35,7 kW para ACS. Sin embargo, esta potencia puede estar sobredimensionada, ya sea porque se escogió con demasiada potencia para la instalación o porque cambios como la mejora de ventanas, patrones de consumo, o climatología han hecho que la demanda ahora sea menor, desaprovechándose potencia instalada. Por lo tanto, lo primero será determinar el valor adecuado de potencia. Para ello hay varios enfoques:

1. Cálculo estimado **basado en las características del hogar** (cerramientos, aislamientos y superficie): este primer método tiene en cuenta los niveles de aislamiento, el tamaño, y la antigüedad del edificio para estimar la demanda térmica. Según Eurovent Certified Performance [59], al tratarse de un edificio antiguo con ventanas nuevas y de alta calidad (renovado), un valor razonable es 0,08 kW/m². Por lo tanto, para una superficie de 260m² la potencia necesaria de calefacción rondaría los 20,8 kW.

2. Cálculo estimado **basado en el consumo real**: este segundo enfoque calcula la potencia de calefacción teniendo en cuenta el consumo real de gas anual (18.000 kWh, analizado en la *sección 3.3.2*) y las horas de uso. Considerando que el uso de la calefacción abarca los 150 días de los cinco meses entre noviembre y marzo, es razonable considerar

que la calefacción se usa entre 6 y 12 horas al día de manera intermitente. Esto se debe a que el regulador automático del sistema hace que se encienda y apague en función de las lecturas de los sensores de temperatura. Por otro lado, el uso de ACS durante todo el año se puede estimar en 1 hora al día. Por lo tanto, las horas anuales de uso se estiman entre 900 y 1800. Dividiendo el consumo total entre las horas de uso, la potencia necesaria estaría en el intervalo de 10 a 20 kW.

Esto tiene sentido, ya que consumiendo 26.000 kWh (previo a cambio de ventanas) este cálculo estima hasta 29 kW necesarios, por lo que dejando un 20% de margen es coherente seleccionar una caldera de 35 kW (la actual). No obstante, el cambio de ventanas ofrece la oportunidad de reducir dicho valor al haber reducido la demanda térmica en un 30%.

En definitiva, considerando el límite superior de ambos métodos (20 kW) y dejando un margen conservador del 25% se dimensionará la aerotermia con 25 kW de potencia de calefacción, lo cual ya representa una disminución de 10kW (28%) respecto al valor actual.

Entre los principales fabricantes de bombas de calor aerotermia se encuentran Daikin, Mitsubishi, Panasonic y el propio Saunier Duval. Por el buen desempeño del AC estos años, y por consolidar fabricantes de posibles obras futuras (5.3.1), se ha optado por seleccionar la **bomba de calor aerotermia 25kW Mitsubishi Ecodan Bibloc PUHZ-SW200YKA**. La unidad interior compatible será la ERSE-YM9ED.

Se trata de la opción que mejor se adecua a las necesidades de la instalación, ofreciendo buenos valores de SCOP W55 (3,78 para climas cálidos), eficiencia energética (A++) y ruido (45dB en el interior) a un precio razonable (11.741€ en Mitsubishi, 10.798€ en AutoSolar). El SCOP W55 (agua a 55°C) es el relevante al utilizarse los radiadores de aluminio como circuito de refrigeración, a pesar de que el W35 tenga un valor notablemente mayor (5,35). El equipo tiene una capacidad calorífica de 25kW, frigorífica de 20kW, y su alimentación es trifásica a 400V y con corriente máxima de 31A. Se adjunta ficha en el *Anexo III*.

El único inconveniente del equipo es el uso de gas refrigerante R410A, el cual tiene mayor GWP como ya se ha mencionado en capítulos previos. No obstante, se ha obviado por motivos económicos y de comodidad, puesto que equipos con R32 no alcanzan la potencia dimensionada, siendo necesarios múltiples equipos (mayor espacio, complejidad logística, coste). En paralelo, la serie Ecodan Zubadan no se ha considerado adecuada al ser más costosa y no tener Madrid climas extremos (muy rara vez temperaturas menores a -5°C).

5.4.3 IMPACTO EN EL CONSUMO Y MEDIOAMBIENTE

La aerotermia puede proporcionar tanto calefacción en invierno como refrigeración en verano, pero en este análisis se considerará únicamente su impacto en la calefacción. Esto se debe a que el sistema se conectará a radiadores de aluminio existentes, los cuales no son óptimos para refrigeración. Además, el aire acondicionado ofrece una respuesta más rápida y un mayor confort térmico en verano en comparación con la refrigeración por radiadores.

Para que la refrigeración por radiadores fuese viable, sería necesario instalar radiadores híbridos o de baja temperatura, o bien incorporar un sistema de turbofans con regulación automática del flujo de aire para mejorar su rendimiento. Sin embargo, estos elementos quedan fuera del análisis para garantizar una comparación homogénea entre la caldera y la aerotermia.

Para medir el impacto en el consumo es importante recordar que la caldera de gas consume principalmente gas (18.000 kWh/año) demandando muy baja potencia eléctrica (102 W) mientras que la aerotermia consumirá electricidad demandando elevada potencia eléctrica. Por lo tanto, el impacto se puede desglosar en:

- **Impacto en la potencia contratada (no afecta al consumo per se, pero es importante de cara al modelo económico):** al contar en la potencia contratada actual de la vivienda (12 kW) con la demanda de las unidades AC (7,5 kW sin incluir coeficientes C_s y $K_{u,o}$ 3,68 kW con coeficientes), y teniendo en cuenta que nunca se conectarán simultáneamente AC (verano) y aerotermia (invierno),

basta con ver la diferencia entre ambas potencias de alimentación una vez aplicados los coeficientes.

Para el cálculo de la potencia eléctrica demandada se puede usar el SCOP y la potencia nominal de calefacción:

$$SCOP = \frac{P_{calefacción}}{P_{eléctrica}} \rightarrow P_{eléctrica} = \frac{25kW}{3,78} = 6,6 \text{ kW}$$

Por otro lado, para la potencia pico (peor escenario en arranque o en condición extrema), al ser la alimentación trifásica con corriente máxima de 31A, y considerando un factor de potencia de 0,9:

$$P_{max} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{max} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 31A \cdot 0,9 = 19,3 \text{ kW}$$

Esta potencia es a la que habrá que dimensionar la instalación a nivel protecciones eléctricas y cableado, para evitar potenciales riesgos como incendios por sobrecorrientes. No obstante, no hace falta considerar la potencia de arranque para la contratada siempre que sólo suceda durante un breve instante.

Por lo tanto, manteniendo un criterio conservador, es razonable considerar que la potencia de alimentación es de 6,6kW. Teniendo en cuenta un factor de utilización de 0,8, la potencia necesaria será de 5,3 kW. Por lo tanto, se necesitará en torno a 1,6 kW adicionales de potencia contratada respecto a la necesitada por el AC: $5,3 - 3,7 \text{ kW} = 1,6 \text{ kW}$

- **Impacto en el consumo:** cambiará tanto el tipo de consumo (gas/electricidad) como la cantidad de kWh. Para ello hay que considerar que las bombas de calor cuentan con altos COP y EER, de igual modo que la bomba de calor seleccionada en la sección 5.3.1, lo que contribuye a lograr mejores eficiencias y menor consumo. En concreto, la bomba seleccionada posee un SCOP W55 de 3,78; por

lo que consumirá alrededor de 4.762 kWh eléctricos anuales. Habrá que combinar la reducción de 18.000 kWh de gas con el nuevo consumo eléctrico.

Pasando estas cifras a energía primaria, esta propuesta supone el ahorro de 21.600 kWh de consumo de gas a expensas de consumir 8.334 kWh adicionales de electricidad.

Y, por lo tanto, se evita la emisión de 5.443 kg de CO₂, pero emitiendo 2.008 kg de CO₂, por lo que el **balance neto** de la iniciativa es **evitar la emisión de 3.435 kg de CO₂**, lo que supone una reducción del 44% de las emisiones totales de la instalación.

5.4.4 MODELO ECONÓMICO

Los beneficios económicos de esta medida vienen dados en forma de ahorro en el consumo de gas y subvenciones. Para los costes, además del CAPEX, habrá que considerar los costes ligados al consumo eléctrico y al aumento de potencia contratada descritos en la sección previa. El precio del equipo se ha considerado de 11.741€, asumiendo que la diferencia de 8% entre el precio del fabricante y el del comercial es la instalación.

Al igual que en el apartado 5.3.1, el horizonte de inversión se ha considerado de 25 años. Aunque estos equipos tienen vida útil de 15 a 20 años, al emplearse exclusivamente durante los meses de invierno se ha supuesto una mayor vida útil, tal y como ha sucedido con las actuales unidades AC (21 años de antigüedad y operativas).

Para el coste de capital o WACC, se ha considerado el mismo valor que para el reemplazo de las unidades AC (4,76%), puesto que se ha considerado similar riesgo y retorno esperado.

Además de todo lo ya mencionado, para el modelo económico es muy importante razonar bien la evolución en los precios de la electricidad y el gas. Si se considera que ambos crecen de manera similar, en paralelo a la inflación por ejemplo (o ligeramente por encima o debajo), los flujos de caja de cada año son prácticamente nulos, siendo por ende muy poco rentable la inversión (costaría similar el gas que la electricidad cada año, sirviendo los 11.700€ de inversión para únicamente reducir emisiones).

Analizando las tendencias en los mercados del gas y de la electricidad, y teniendo en cuenta la elevada incertidumbre para los próximos 25 años, se ha optado por suponer 3 escenarios posibles:

- **Escenario A** alcista para el gas y bajista para la electricidad: este escenario supone que sanciones al gas por regulaciones ambientales y conflictos geopolíticos provocarán una escalada en los precios del gas. Sin embargo, la inclusión de renovables en el mix energético causaría un descenso en el LCOE (Levelized Cost of Energy, costes normalizados de generación) que repercutiría en el precio final. Se considera que este escenario es el más probable, en línea con proyecciones de la EIA sobre el precio del GNL [60], vistas en el siguiente gráfico:

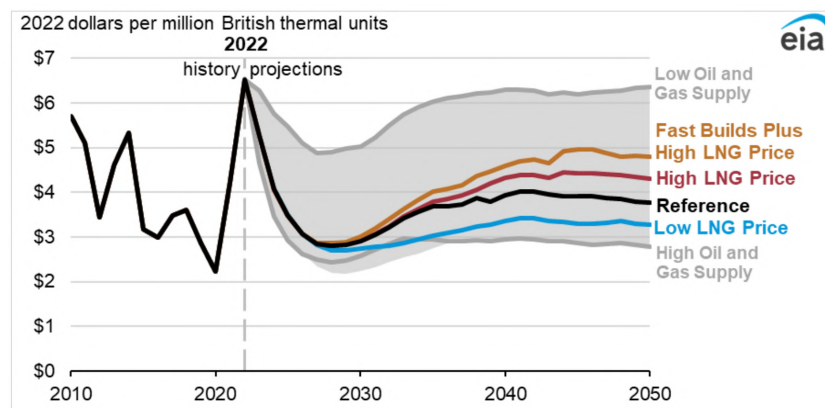


Figura 34. AEO2023 Proyecciones del precio spot del gas natural [60]

Como se puede ver, la EIA estimaba en 2023 que, dejando de lado los conflictos geopolíticos del 2022, a partir de 2025-2026 la tendencia del precio del gas natural sería alcista durante los siguientes 20 años tanto para un escenario de alta oferta (menor crecimiento) como de baja oferta (mayor crecimiento). Por otro lado, para la electricidad, un informe reciente de BBVA Research [61] argumenta que la penetración de renovables en el mix ya ha reducido en un 20% los precios mayoristas en los últimos 3 años, y podrían reducirlos en hasta un 20% adicional para 2030 si se siguen cumpliendo los objetivos del PNIEC.

- **Escenario B** bajista para el gas y alcista para la electricidad: al contrario que el escenario A, este escenario supone que una menor demanda de gas por parte de los consumidores en los próximos años provocará un exceso de oferta de gas y un consiguiente descenso en los precios (ley de la oferta y la demanda). En cuanto a la electricidad, problemas geopolíticos o desequilibrios en la red causarían un mayor precio. Se considera que este escenario es menos probable que el anterior.
- **Escenario C** neutro: esta tercera opción recoge puntos intermedios en los que gas y electricidad siguen una tendencia similar en el corto y medio plazo (ambos alcistas, ambos bajistas, o ambos neutros ajustados a la inflación).

El modelo económico base de la propuesta, representado bajo un escenario intermedio entre el A y el C, en el que el gas asciende con la inflación y la electricidad algo por debajo, puede verse a continuación:

	2025	2026	2027	2028	...	2048	2049	2050
Año	0	1	2	3	...	23	24	25
Inflación	1	1,02	1,05	1,07		1,69	1,73	1,77
"Ingresos" o ahorros								
Ahorro anual gas (kWh)		18.000	18.000	18.000	...	18.000	18.000	18.000
Coste variable CUR 3 (€/kWh)		0,040	0,041	0,042	...	0,065	0,067	0,069
<i>Crecimiento coste variable gas</i>		2,3%	2,3%	2,3%	...	2,3%	2,3%	2,3%
Impuesto al gas (€/kWh)		0,002	0,002	0,002	...	0,002	0,002	0,002
Ahorro tarifa variable gas (€)		757	773	790	...	1.221	1.248	1.275
Ahorro tarifa fija gas (€)		179	183	187	...	295	302	309
Ahorro IVA 21%		197	201	205	...	318	325	333
Ahorro gas (€)		1.132	1.157	1.183	...	1.834	1.875	1.917
Deducción por subvenciones	2.348							
Costes								
Consumo anual electricidad (kWh)		4.762	4.762	4.762	...	4.762	4.762	4.762
Coste variable Plan Estable (€/kWh)	0,140	0,141	0,143	0,144	...	0,176	0,177	0,179
<i>Crecimiento coste variable electricidad</i>		1,0%	1,0%	1,0%	...	1,0%	1,0%	1,0%
Coste tarifa variable elect. (€)		672	679	686	...	837	845	854
Coste tarifa fija elect. (€)		64	65	66	...	80	81	82
Impuesto electricidad (5,1%)		37,6	37,9	38,3	...	46,8	47,2	47,7
IVA (21%)		162,6	164,2	165,9	...	202,4	204,4	206,4
Coste extra electricidad (€)		(937)	(946)	(956)	...	(1.166)	(1.178)	(1.189)
CAPEX	(11.741)				...			
EBITDA	(9.393)	195	211	227	...	668	698	728
D&A		(470)	(470)	(470)	...	(470)	(470)	(470)
EBIT	(9.393)	(274)	(259)	(243)	...	199	228	258
FCF	(9.393)	195	211	227	...	668	698	728

Tabla 18. Modelo económico base de la aerotermia [Elaboración propia]

El modelo refleja una TIR del 0,9%, en la que el periodo de retorno resulta de 23 años. A pesar de ser positiva, considerando la inflación base y la WACC estimada, no sería económicamente atractivo acometer la inversión. No obstante, para analizar los tres escenarios supuestos (A, B, C) se ha realizado una matriz de sensibilidad:

		Crecimiento precio electricidad (%)					
		0,9%	-2,0%	-0,5%	1,0%	2,0%	3,5%
Crecimiento precio gas (%)	-1,0%	-1,8%	-7,3%	-	-	-	-
	0,5%	1,6%	-0,9%	-7,2%	-	-	-
	2,3%	4,8%	3,3%	0,9%	-1,9%	-	-
	4,0%	7,4%	6,3%	4,8%	3,4%	-0,3%	-
	5,5%	9,5%	8,7%	7,5%	6,6%	4,5%	-

Tabla 19. Matriz de sensibilidad modelo económico aerotermia [Elaboración propia]

Como se puede observar en la matriz, se trata de una medida que sólo es verdaderamente rentable ($TIR > 4\%$) para escenarios bajistas del precio de la electricidad y alcistas en el precio del gas (cuadrante inferior izquierdo, escenario A), o que contemplen un significativo crecimiento del precio del gas (4 o 5,5%). Es decir, sí se cumple la hipótesis del escenario A en la que los precios del gas aumentan notablemente, resultará atractiva la inversión. Para el escenario B (cuadrante superior derecho) la rentabilidad es muy negativa, siendo los flujos iniciales positivos, pero cambiando a negativos a los pocos años, y no habiendo por tanto una TIR calculable. En cuanto al escenario C (diagonal), las rentabilidades resultan ligeramente negativas.

En definitiva, a pesar de que el escenario que se considera más probable es el A, la rentabilidad económica de esta propuesta tiene mucha incertidumbre al depender en gran medida de conflictos geopolíticos y regulaciones que corrijan los precios de ambas *utilities*.

Por otro lado, en lo ambiental sí hay certeza de que esta medida contribuirá a reducir las emisiones y el impacto notablemente.

5.5 ALMACENAMIENTO Y CONEXIÓN TRIFÁSICA

Esta última parte del capítulo de propuestas de mejora tiene como objetivo tratar de reducir los problemas relacionados con la elevada potencia contratada en la vivienda. En los últimos dos años la instalación ha visto incrementada la potencia contratada en dos ocasiones y, a pesar de haber sido necesario como se probó en el capítulo *4.2. Aumento de la potencia eléctrica contratada*, existen soluciones a esta problemática.

5.5.1 ALMACENAMIENTO

La primera alternativa consiste en instalar un equipo de almacenamiento que sea capaz de cubrir los picos de demanda. De este modo no se precisará de tanta potencia contratada con Iberdrola puesto que en los momentos puntuales en los que se requiere de 11,85 (12) kW se podrá emplear energía procedente de este equipo.

Descripción técnica

Los equipos de almacenamiento de energía acumulan energía (en forma de energía química, potencial, mecánica, etc.) para su posterior uso diferido. Entre los principales tipos destacan las baterías de ión de litio (química), bombeo hidráulico o *pumped storage* (potencial), volantes de inercia (mecánica), supercondensadores (eléctrica), almacenamiento térmico (térmica) o aire comprimido (mecánico). Estos equipos dotan a las instalaciones de mayor eficiencia, resiliencia y autonomía.

Para el caso de una instalación residencial, por tamaño, vida útil, capacidad modular, eficiencia y coste, la solución más lógica es la de emplear baterías de ión de litio. Estas funcionan mediante un proceso reversible en el que los iones de litio se desplazan entre el ánodo y el cátodo a través de un electrolito, almacenando y liberando energía según la carga y descarga. Este sistema permite una alta eficiencia (>90%), una larga vida útil (7-15 años

según Iberdrola [62]) y una elevada densidad energética en comparación con otras tecnologías.

El proceso por el que los iones de Litio y electrones se mueven entre ánodo (cargado negativamente) y cátodo (cargado positivamente) en función de la carga/descarga puede verse en la siguiente figura ilustrativa:

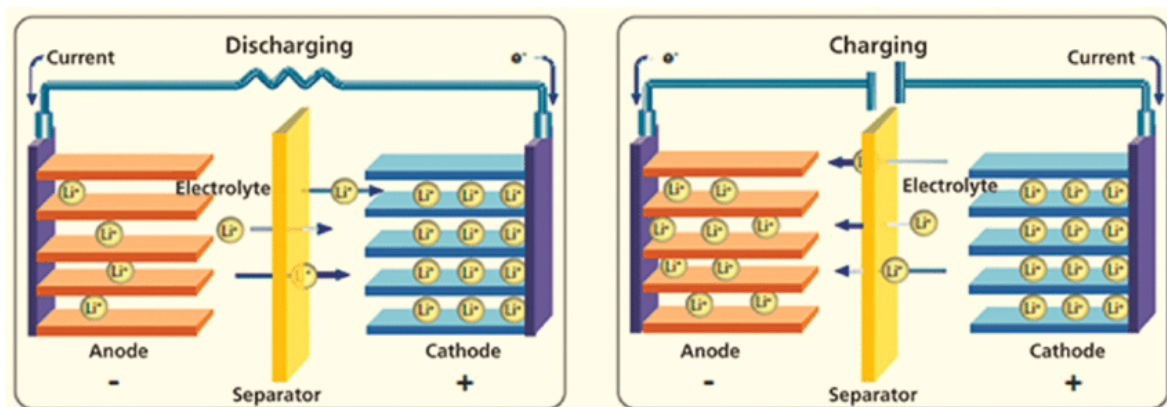


Figura 35. Funcionamiento de una pila de ión de litio [63]

Dimensionamiento y diseño de la instalación

Para dimensionar adecuadamente esta propuesta es necesario determinar la capacidad de almacenamiento necesaria (medida en kWh almacenables) y la potencia de salida (medida en kW). Además, también son importantes otros factores como los ciclos de vida, la eficiencia, la profundidad de descarga o el tiempo de carga.

Dado que el principal problema que se busca solucionar es la alta potencia contratada por la simultaneidad de varios equipos en momentos pico, lo primero es fijar cuántos kW de potencia de salida se necesitan y durante cuánto tiempo. En concreto, el problema (*worst-case*) sucede únicamente en verano al conectar simultáneamente las unidades AC de 7,5 kW instalados (sin contar factor de simultaneidad ni utilización) con electrodomésticos del circuito especial I (lavadora, lavavajillas, plancha) de 5,6 kW. Esto provoca un aumento de la potencia contratada necesaria de en torno 8,5 kW a 12 kW, teniendo en cuenta factores K_u y C_s .

Con lo anterior, se estima que la batería deberá tener 3,5 kW de potencia de salida, y ser capaz de abastecer durante 90 minutos (ciclo de máxima duración de lavadora y lavavajillas). Por lo tanto, deberá tener capacidad de almacenar al menos 5,25 kWh.

Dado que descargar las baterías al máximo en cada ciclo no es beneficioso para la vida útil del equipo, se priorizará un equipo con algo más de capacidad. Además, también se dejará un margen en la potencia de salida, garantizando que la potencia útil sea de 3,5 kW de manera continuada.

Una opción económica y modular es la batería **HVS 7.7 del fabricante chino BYD**. Este equipo cuenta con 7,68 kWh de almacenamiento, dejando suficiente margen por cada ciclo necesario, y una potencia de salida de 7,68 kW (307V de tensión nominal y 25A de corriente máxima de salida). Además, posee una eficiencia de más del 96% y una garantía de 10 años. Por último, se trata de una gama modular que permite incluir nuevos módulos de 2,76 kWh de manera sencilla y rápida, permitiendo la expansión de la instalación en el futuro. En cuanto al coste del equipo, ronda los 3.708€ según el vendedor Solar Top Store. Se adjunta ficha del equipo en el *Anexo IV*.

Impacto en el consumo y medioambiente

Esta medida a priori no tiene impacto en el consumo de la vivienda, puesto que no es una fuente de generación limpia, ni ofrece reducción en el consumo de la vivienda. Tanto la cantidad de energía necesaria, como su origen, permanecen inalterados y por lo tanto a priori no hay impacto en esta sección.

No obstante, si hay cierto impacto ambiental si se considera que esta propuesta contribuye a aplanar la curva de la demanda en España, consumiendo más energía de la red en horarios valle en los que hay generación renovable (15.00 horas) para cargar la batería y consumiendo menos en horarios pico en los que la red emplea generación fósil (9.00 o 22.00 horas).

La siguiente figura muestra la evolución horaria del precio de la demanda en España los últimos años, donde se puede ver identificar que las horas pico tienen lugar en las franjas de 7.00 - 10.00 de la mañana y 19.00 – 23.00 de la noche.

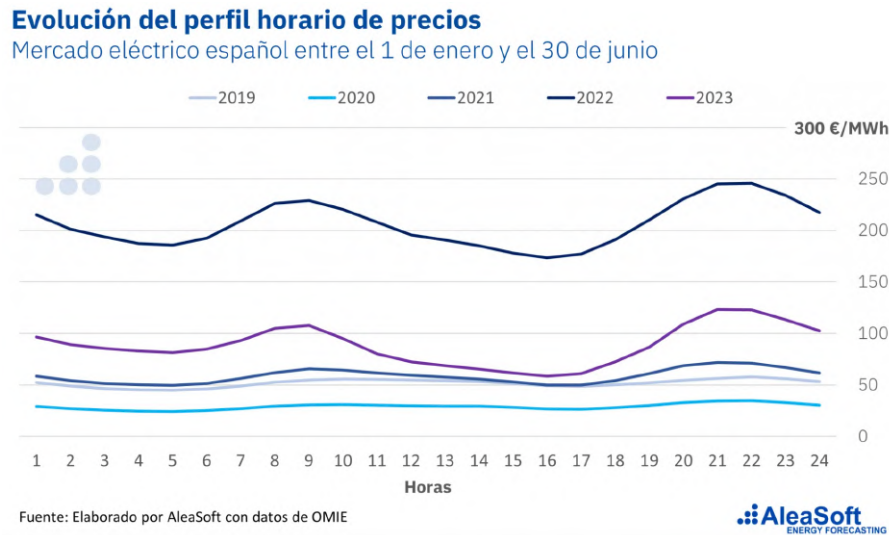


Figura 36. Evolución horaria del precio de la electricidad [64]

Por otro lado, las siguientes dos figuras muestran el origen de la energía horaria por tecnología según el mercado diario del MIBEL (Mercado Ibérico de la Electricidad), operado por el OMIE (Operador del Mercado Ibérico de la Energía):

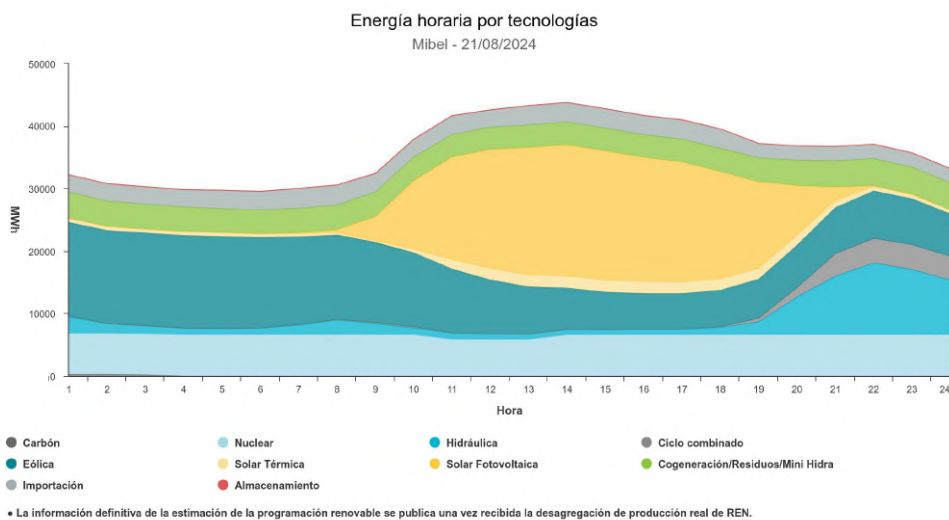


Figura 37. Distribución energía horaria por tecnologías en día de verano [65]

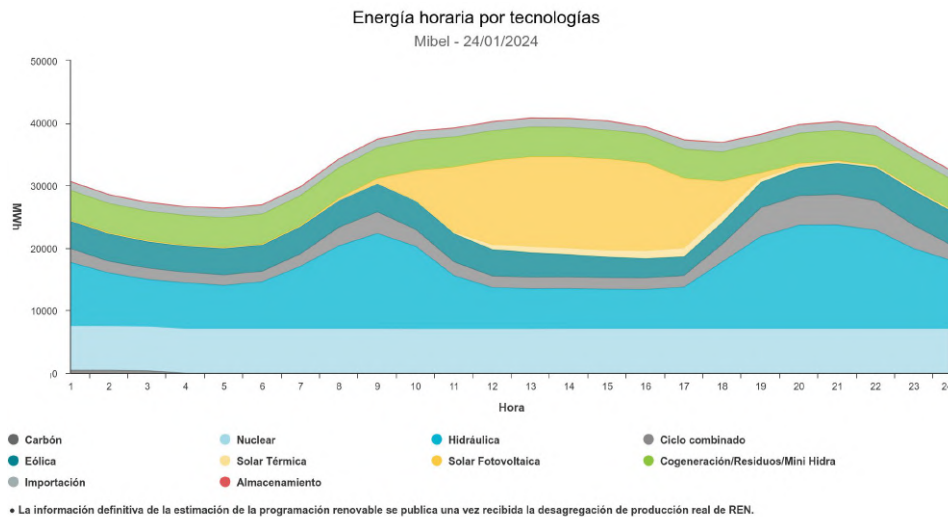


Figura 38. Distribución energía horaria por tecnologías en día de invierno [65]

Como se puede ver, a pesar de un valor constante de cogeneración (en verde), y un nulo de carbón, en ambas curvas existe un pico en la generación de ciclo combinado en el periodo pico nocturno de 18.00 a 24.00, y en invierno también en el de 7.00 – 11.00, lo que revalida que esta medida contribuirá a reducir la demanda fósil y aplanar la curva de demanda.

Para cuantificar este impacto se ha definido el uso diario de las baterías, concretando los ciclos de carga y descarga en base al consumo real de la instalación. Teniendo en cuenta la capacidad de 7,68 kWh, pero asumiendo que sólo el 90% (6,91 kWh) es útil para no afectar a su durabilidad, y que la potencia de carga es de 3,5 kW al igual que la de descarga, la batería tardará 120 minutos (2 horas) en cargarse o descargarse a máxima potencia.

Analizando las curvas de demanda horaria en verano e invierno de la instalación (sección 3.3.1, concretamente Figura 16 a Figura 20), el consumo diario medio en días estándar es de 13 kWh (oscila entre 10 y 16 principalmente), y en días de verano de 30 kWh (entre 20 y 40). Además, durante el tramo pico de mañana 10:00-14:00 el consumo en estándar es de 5,5 kWh entre semana y 1 kWh en fin de semana, mientras que en verano se sitúa en 11 kWh entre semana y 6 kWh en fin de semana. Respecto al tramo pico de noche

(18:00-24:00), el consumo en estándar es de 3 kWh entre semana y 5 kWh en fin de semana, mientras que en verano es de alrededor de 12 kWh entre semana y 10 kWh en fin de semana.

Aprovechando tarifas punta, llano y valle, y considerando el consumo real de la vivienda, primero se ha supuesto un sistema de dos ciclos de carga (uno entre las 3:00 y 6:00 que se descarga entre las 10:00 y 14:00; y otro entre las 14:00-18:00 que se descargue por la noche entre las 18:00 y 24:00). Teniendo en cuenta las demandas en cada tramo, y la capacidad de 6,9 kWh de la batería, este planteamiento requeriría cargas y descargas parciales en fines de semana y por la noche durante meses estándar. No obstante, en lo ambiental, se ha optado por analizar el porcentaje fósil de una muestra representativa de días (10) a lo largo de 2024 a fin de comprobar la hipótesis planteada:

Ciclo	Franja horaria	Tipo	% fósil incluyendo Import. como fósil	% fósil con Import. como renovable
Ciclo A	3 a 6	Carga	21%	17%
Ciclo B	10 a 14	Descarga	14%	12%
Ciclo C	14 a 18	Carga	13%	12%
Ciclo D	18 a 24	Descarga	19%	16%

Tabla 20. Análisis horario % de generación fósil del mix según Mibel, muestra de 10 días representativos de 2024 [65] [Elaboración propia]

Como se puede ver en las columnas 4 y 5 de la tabla, este análisis indica que la hipótesis inicial, en la que se planteaba que en el ciclo A habría menos porcentaje fósil que en el tramo pico B, es errónea. En el ciclo A hay más cantidad fósil que en el B, por lo que esta medida no sería del todo beneficiosa en términos ambientales.

Por lo tanto, a raíz de esto y considerando las restricciones surgen dos posibles enfoques con sentido:

- 1) **Priorizar beneficio económico:** se carga la batería durante los ciclos valle A y C, descargándose esta durante los ciclos picos B y D. Se resuelve el problema de la potencia contratada y se saca rédito financiero (mejores tarifas) pero no tiene a penas impacto ambiental, pues en neto se están evitando emisiones pasando el consumo de D a C, pero se contrarrestan de B a A. Además, requeriría ciclos de

carga y descarga parciales en fin de semana y durante meses estándar por la noche.

- 2) **Modelo híbrido o intermedio:** se carga la batería exclusivamente durante el ciclo C, de bajas emisiones y tarifa valle, y se descarga durante los ciclos D y B (donde hay tarifa pico y problemas de potencia contratada). Se desaprovecha la tarifa valle de 0:00-8:00 por no proporcionar beneficios ambientales.

Se ha considerado que la mejor opción para la instalación, teniendo en cuenta los objetivos que se persiguen y los potenciales resultados es la número 2. De tal forma no se cargará ni descargará la batería en el tramo A al ser el que mayor fracción de generación fósil tiene. Por lo tanto, cada día sucederá lo siguiente:

- Ciclo de carga entre las 14:00 y 18:00 (tramo C) que aproveche la tarifa valle, en el que se aprovechará principalmente la generación fotovoltaica durante todo el año.
- Ciclo de descarga 1 entre las 18:00-24:00 (tramo D), con el consumo de las unidades AC (en verano) además de otros consumos tal y como se analizó en el apartado 3.3.1.
- Ciclo de descarga 2 entre las 10:00 y 14:00 (tramo B), momento en el que se conecta el circuito especial I de manera diaria, tal y como se analizó en el apartado 3.3.1.

De este modo, considerando los porcentajes de generación fósil de la *Tabla 20*, lo descargado en D por la batería supone evitar un 6% de las emisiones correspondientes al consumirse realmente en C, mientras que lo descargado en B apenas tiene impacto ambiental (B y C misma generación renovable vs fósil).

Para concretar las distintas casuísticas que faciliten el cálculo ambiental y económico se ha segmentado el análisis en función de (I) mes estándar vs verano y (II) entre semana vs fin de semana:

- Caso 1: Mes estándar entre semana: se consumen 3 kWh en el tramo D y 3,9 kWh en B hasta agotar la carga.
- Caso 2: Mes estándar en fin de semana: se consumen 5 kWh en el tramo D y 1 kWh en B. La batería se descargará parcialmente al no haber mayor demanda del sistema.
- Caso 3: Mes de verano entre semana: se consumen 3,5 kWh en el tramo D y se reservan los otros 3,4 kWh para el tramo B, amortiguando picos de demanda en ese tramo. El objetivo es alojar energía almacenada a cada tramo pico para garantizar que se compensan los picos de potencia demandada.
- Caso 4: Mes de verano en fin de semana: se consumen 3,5 kWh en el tramo D y se reservan los otros 3,4 kWh para el tramo B, similar al caso 3.

Teniendo en cuenta los 8 meses de estándar (243 días) y 4 de verano (122 días), con 5 de 7 días entre semana y 2 de 5 fin de semana; las emisiones evitadas por esta iniciativa se calculan como:

- Caso 1: $243 \text{ días estándar} \cdot 5/7 \text{ entre semana} \cdot 3 \text{ kWh en D} \cdot 1,75 \text{ factor energía primaria/final} \cdot 0,241 \text{ kg de CO}_2/\text{kWh} \cdot 6\% = 13,2 \text{ kg de CO}_2$
- Caso 2: $243 \text{ días estándar} \cdot 2/7 \text{ fin de semana} \cdot 5 \text{ kWh en D} \cdot 1,75 \text{ factor energía primaria/final} \cdot 0,241 \text{ kg de CO}_2/\text{kWh} \cdot 6\% = 8,8 \text{ kg de CO}_2$
- Caso 3: $122 \text{ días de verano} \cdot 5/7 \text{ entre semana} \cdot 3,5 \text{ kWh en D} \cdot 1,75 \text{ factor energía primaria/final} \cdot 0,241 \text{ kg de CO}_2/\text{kWh} \cdot 6\% = 7,8 \text{ kg de CO}_2$
- Caso 4: $122 \text{ días de verano} \cdot 2/7 \text{ fin de semana} \cdot 3,5 \text{ kWh en D} \cdot 1,75 \text{ factor energía primaria/final} \cdot 0,241 \text{ kg de CO}_2/\text{kWh} \cdot 6\% = 3,1 \text{ kg de CO}_2$

Es decir, en total esta propuesta consigue **evitar alrededor de 33 kg de CO₂ al año** de los 2.383 kg de CO₂ que se emiten actualmente por consumo eléctrico. Por lo tanto, se logra una reducción del 1,4% de las emisiones eléctricas, o del 0,42% si se consideran las de gas también. En definitiva, ambientalmente esta medida tiene un impacto prácticamente irrelevante.

Modelo económico

Esta medida proporciona beneficios económicos de dos formas. La primera de ellas es mediante la reducción de la potencia contratada. En concreto, esta instalación está dimensionada para permitir la reducción de 3,5 kW de potencia contratada. Dado que las tarifas actuales son 0,08754 €/kW/día contratado en pico y 0,003491 €/kW/día en valle según lo visto en 3.3.1, esta propuesta permite ahorrar 8,5€ fijos mensuales a los que hay que sumar impuestos de la electricidad e IVA, alcanzando un ahorro final de 10,8€/mes o 129,8€/año.

Las tarifas del Plan Online 3 Periodos de Iberdrola con potencia contratada de hasta 10 kW son las siguientes:

- Valle: precio por potencia de 0,013014€/kW día y precio de energía consumida de 0,098904 €/kWh
- Llano: precio de energía consumida de 0,130892 €/kWh
- Punta: precio por potencia de 0,086301 €/kW día y precio de energía consumida de 0,183576 €/kWh

Donde la carga se realiza en el periodo llano (14.00 – 18.00), las descargas en punta (10.00 – 14.00 y 18.00 – 22.00), y los fines de semana son valle.

Para cuantificar adecuadamente los ahorros de esta propuesta se va a suponer que el caso base es el consumo actual suscrito a este plan, y el caso a evaluar implementar las baterías aprovechando los distintos tramos. El racional de esto es no confundir resultados los resultados del uso de ciclos con los del cambio de plan. Otra propuesta a futuro es analizar únicamente el cambio de Plan Estándar a Plan Online 3 Periodos manteniendo el *statu quo*.

Suponiendo que las potencias de valle y punta son la misma (8,5 kW), el ahorro se ha calculado como la diferencia entre la tarifa fija (de 12 kW a 8,5 kW) más la parte variable de la cantidad descargada en los tramos punta menos la cargada en los valle, siguiendo los mismos cuatro casos que en el cálculo de impacto ambiental:

Parte fija:

$$3,5 \text{ kW} \cdot (0,013014 \text{ €/kW día} + 0,086301 \text{ €/kW día}) \cdot 365 \text{ días} = 126,9 \text{ €/año}$$

Parte variable:

- Caso 1: 243 días estándar · 5/7 entre semana · (3 kWh en D + 3,5 kWh en B) · (0,183576 €/kWh punta - 0,130892 €/kWh llano) = 59,44 €/año
- Caso 2: fin de semana todo es valle → 0€ de ahorro
- Caso 3: 122 días de verano · 5/7 entre semana · (3,5 kWh en D + 3,4 kWh en B) · (0,183576 €/kWh punta - 0,130892 €/kWh llano) = 31,68 €/año
- Caso 4: fin de semana todo es valle → 0€ de ahorro

En definitiva, la parte variable supone una reducción de costes de 91,12 euros anuales más impuestos. Por tanto, el ahorro anualizado de reducir la potencia contratada y aprovechar los periodos de facturación es de 218 euros en el año cero (más impuestos). Se supondrán varios escenarios de variabilidad en el precio de la electricidad. Para el ahorro por aprovechamiento de tarifas llana vs punta, se va a suponer que ambas crecerán de manera similar con el tiempo, por lo que el ahorro será más o menos constante.

Teniendo en cuenta para el horizonte de inversión la vida útil de 15 años del equipo, y aplicando una WACC conservadora (4,76%), el modelo económico puede verse a continuación:

	2025	2026	2027	2028	...	2038	2039	2040
Año	0	1	2	3	...	13	14	15
Inflación	1	1,02	1,05	1,07		1,35	1,38	1,41
"Ingresos" o ahorros								
Ahorro potencia contratada (kW)		3,5	3,5	3,5	...	3,5	3,5	3,5
Coste fijo electricidad (€/kW/día)		0,0993	0,1008	0,1023	...	0,1187	0,1205	0,1223
<i>Crecimiento tarifa fija electricidad (%)</i>		1,5%	1,5%	1,5%	...	1,5%	1,5%	1,5%
Ahorro tarifa fija (€)		127	129	131	...	152	154	156
Ahorro impuesto electricidad (5,1%)		6,5	6,6	6,7	...	7,7	7,9	8,0
Ahorro IVA (21%)		28,0	28,4	28,8	...	33,5	34,0	34,5
Ahorro total potencia contratada (€)		161	164	166	...	193	196	199
Ahorro por aprovechamiento de tarifas (€)		91	92	94	...	109	111	112
<i>Crecimiento tarifa variable electricidad (%)</i>		1,5%	1,5%	1,5%	...	1,5%	1,5%	1,5%
Ingreso por subvenciones (€)	411							
Costes								
CAPEX	(4.108)							
EBITDA	(3.697)	252	256	260	...	302	306	311
D&A		(274)	(274)	(274)	...	(274)	(274)	(274)
EBIT	(3.697)	(21)	(18)	(14)	...	28	33	37
FCF	(3.697)	252	256	260	...	302	306	311

Tabla 21. Modelo económico base de la batería [Elaboración propia]

Como se puede apreciar, el modelo económico base arroja una TIR del 1,6% con un *payback* de 13,3 años. Se trata de una rentabilidad baja teniendo en cuenta la elevada inversión inicial y el bajo impacto ambiental de la propuesta.

Al igual que en secciones anteriores, se ha realizado un análisis de sensibilidad con la variabilidad del precio de la electricidad (entre -1 y 4%, cubriendo escenarios alcista y bajista) y con el ahorro variable por ciclos de carga y descarga. Esto último se debe a que la eficiencia del equipo y los patrones de consumo del hogar pueden afectar a un mayor o menor aprovechamiento de la batería y del consiguiente ahorro real. Se puede ver el resultado a continuación:

		Crecimiento tarifa fija electricidad (%)					
		1,6%	-1,0%	0,5%	1,5%	2,5%	4,0%
Ahorro por aprovechamiento de tarifas (€)	60	-2,2%	-0,9%	0,0%	0,9%	2,1%	
	75	-1,4%	-0,1%	0,8%	1,7%	3,0%	
	91	-0,6%	0,7%	1,6%	2,5%	3,8%	
	105	0,1%	1,4%	2,3%	3,2%	4,5%	
	120	0,8%	2,1%	3,0%	3,9%	5,2%	

Tabla 22. Análisis de sensibilidad de la batería [Elaboración propia]

Analizando el abanico de rentabilidades adquirido, se deduce que esta propuesta sólo es económicamente atractiva en escenarios alcistas del precio de la electricidad. Es decir, las únicas TIR notablemente positivas (superiores al 3,5 – 4%) se dan para escenarios en los que la electricidad sube un 2,5 o 4% año a año. Por lo tanto, es una propuesta que financieramente depende en gran medida de la evolución del precio de la electricidad, aún si se logra maximizar el uso de tarifas más económicas.

5.5.2 CONEXIÓN TRIFÁSICA

La presente propuesta consiste en optimizar la instalación eléctrica de la vivienda mediante la conversión de una conexión monofásica (230V, fase y neutro) a una trifásica

(400V fase-fase y 230V fase-neutro). El objetivo principal de este cambio es mejorar la eficiencia del sistema eléctrico, minimizando pérdidas y optimizando la distribución de cargas.

Descripción técnica

Esta propuesta consiste en una obra en la que se realice la instalación de las tres fases por la vivienda y en el exterior, tanto la Derivación Individual (DI, que conecta el contador de la vivienda con la propia instalación interior) como la Línea General de Alimentación (LGA, que abarca desde el cuadro general de mando y protección (CGMP) hasta el contador individual). La acometida que conecta el CGMP del edificio con la red de BT (Baja Tensión) suele ser trifásica, por lo que esta parte permanecerá inalterada.

Dado que todos los equipos actuales se alimentan en configuración monofásica, se distribuirán las tres fases de manera que haya equilibrio entre todos los consumos en cada una de las fases. Actualmente, la vivienda opera bajo un sistema monofásico, lo que implica que todos los dispositivos eléctricos comparten una única fase y neutro. Sin embargo, en un sistema trifásico la energía se distribuye en tres fases (R, S y T) con un neutro común. Esta configuración permite:

1. **Distribución equilibrada de la carga:** Separando los equipos eléctricos en tres fases distintas se evita la sobrecarga en una única línea en un momento dado, reduciendo picos de consumo y optimizando la estabilidad de la instalación.
2. **Menores pérdidas eléctricas:** En sistemas monofásicos, las pérdidas por calentamiento en los conductores son mayores debido a la mayor corriente transportada por una única fase. Al dividir la carga entre tres fases, la corriente en cada conductor disminuye y, por lo tanto, las pérdidas por efecto Joule se reducen.
3. **Mayor eficiencia en motores eléctricos y electrodomésticos:** Algunos equipos eléctricos, especialmente los motores de electrodomésticos como lavadoras o bombas de calor, operan con mayor eficiencia en un sistema trifásico debido a un suministro más estable y menor fluctuación de tensión.

Para implementar este cambio, se instalarían tres fases en la LGA y se redistribuirían los circuitos de la vivienda para garantizar un equilibrio de carga entre las tres fases. La selección de qué dispositivos se conectan a cada fase se basará en los patrones de uso de la vivienda (analizados en la sección 4.2. *Aumento de la potencia eléctrica contratada*), asegurando que los consumos simultáneos estén equilibrados. Por lo tanto, para cada circuito se ha repartido la carga entre las tres fases en base a la potencia estimada, y en paralelo se ha tratado de minimizar la potencia contratada necesaria para cada fase.

Concretamente, la disposición de los consumos eléctricos en cada una de las tres fases a instalar será la siguiente:

Circuito	Elemento	Fase	Potencia consumo (W)	Ku	Cs	Potencia estimada (W)	Potencia circuito (W)
General 0	Iluminación	R	1520,6	1	0,6	912,4	6261,3
	Neveras	R	235	1	1	235	
	Aspiradora	R	500	1	1	500	
	Televisores	S	414	1	0,6	248,4	
	Otros (móviles, ordenadores, etc.)	S	931	1	0,6	558,6	
	Caldera calefacción	T	101,7	1	1	101,7	
	Unidades AC	S y T	7561,7	0,7	0,7	3705,2	
Especial 1	Lavadora-secadora	R	2300	0,73	1	1679	5591
	Lavavajillas	S	2400	0,73	1	1752	
	Plancha de vapor	T	2700	0,8	1	2160	
Especial 2	Placa de cocción	R	4600	0,8	0,6	2208	2368
	Campana extractora	S	160	1	1	160	
Especial 3	Horno	R	3580	0,8	1	2864	2864
Especial 4	Microondas	R	1270	1	1	1270	1360
	Cafetera	S	1260	1	1	1260	
	Batidora	S	600	0,8	1	480	
	Tostadora	T	1700	0,8	1	1360	

Tabla 23. Listado de consumos con su respectiva fase. [Elaboración propia]

Y con estas conexiones equilibradas, la potencia instalada en cada fase, así como la potencia contratada necesaria será de:

Fase	Nº de elementos	Potencia conectada estimada (W)	Potencia contratada necesaria (W)
R	7	9668	4511
S	7	6312	4412
T	4	5474	4114

Potencia contratada óptima:	13037
-----------------------------	-------

Tabla 24. Tabla resumen conexión trifásica. [Elaboración propia]

Como se puede observar, las tres fases tendrán entre 5,5 y 9,7 kW de potencia conectada estimada. Cabe recordar que este valor considera factores de simultaneidad y utilización de las cargas. Sin ponderar estos, la potencia instalada por fase ronda los 10 - 11 kW.

Por otro lado, la potencia contratada necesaria para cada fase se ha calculado aplicando el mismo racional que en la sección 4.2, donde se consideraba la suma del circuito general y de la máxima carga de los circuitos especiales, puesto que estos no son simultáneos. El resultado es de en torno a 4,5 kW contratados por fase, que suman 13,04 kW totales de potencia trifásica. Aplicando un margen razonable, la vivienda requerirá 13,5 kW de potencia contratada.

De este modo, la potencia contratada en trifásica será 1,5 kW mayor que la monofásica actual (12 kW). Por lo tanto, a pesar de que en un primer momento se pensaba que esta medida podría suponer una reducción de la potencia contratada, no ha resultado ser el caso. Sin embargo, la mayor eficiencia de la instalación podrá llevar a menores picos de consumo y pérdidas que sí conlleven ahorros.

Impacto en el consumo y medioambiente

Como se ha introducido en el apartado interior, la conexión trifásica ayudará a reducir el consumo al minimizar pérdidas por efecto Joule y maximizar eficiencias de equipos. No obstante, debido a que todos los consumos seguirán operando en monofásico (conectados a una de las tres fases y al neutro), la mejora de eficiencias por conexión trifásica no se va a ponderar. En lo relativo a las pérdidas por efecto Joule, estas se definen como:

$$P_{\text{pérdidas Joule}} = I^2 \cdot R$$

Dónde R representa la resistencia del conductor (cables) e I la corriente que circula por los cables (alimentando los consumos).

En la conexión trifásica propuesta, la LGA ahora está compuesta por las tres fases (R, S y T) según se ha descrito anteriormente, distribuyendo equitativamente la corriente consumida en esos tres circuitos y minimizando así la potencia de pérdidas.

En concreto, para calcular la disminución en la potencia de pérdidas exacta bastaría con calcular la corriente consumida por cada equipo ($I = P/V$ en conexión monofásica fase-neutro) y estimar la resistencia del cable ($R = \rho \cdot L / S$) donde ρ es la resistividad del conductor (cobre), L la longitud del cable y S la sección transversal del mismo.

Suponiendo que se conservase el conductor (material y sección), y que las longitudes no van a variar en exceso puesto que se han equilibrado los consumos en base a patrones de uso y no a ubicaciones de la instalación, y que las ubicaciones de los cuadros permanecen iguales, las pérdidas variarán proporcionalmente al cuadrado de la corriente. Al dividirse aproximadamente entre tres la corriente por cada fase, esta medida permitiría reducir la potencia de pérdidas de Joule en un 89,1%. El razonamiento se puede ver a continuación:

$$P_{\text{Joule,monofásica}} = I_{\text{monof}}^2 \cdot R_{\text{monof}}$$

$$P_{\text{Joule,trifásica}} = I_{\text{trif}}^2 \cdot R_{\text{trif}}$$

Asumiendo que el conductor (material, sección y longitud) permanece igual como se ha razonado anteriormente:

$$R_{\text{trif}} = R_{\text{monof}}$$

Y, asumiendo que la corriente consumida se divide equitativamente por las tres fases como se ha pretendido en el apartado anterior:

$$I_{\text{monof}} = 3 \cdot I_{\text{trif}}$$

Luego, la reducción en la potencia de pérdidas de Joule es de:

$$\frac{P_{Joule,monofásica}}{P_{Joule,trifásica}} = \frac{I_{monof}^2 \cdot R_{monof}}{I_{trif}^2 \cdot R_{trif}} = \frac{I_{monof}^2}{I_{trif}^2} = \frac{(3 \cdot I_{trif})^2}{I_{trif}^2} = 9 \rightarrow$$

$$P_{Joule,trif} = 0,11 \cdot P_{Joule,monof}$$

Según Rafael De Gracia Navarro [66], director nacional de la ASEP, las pérdidas en distribución de BT se pueden estimar en 5-6%. Estas son principalmente técnicas (Joule principalmente), pero también no técnicas (fraude, alteración equipos de medida, etc.). Entre las técnicas, hay que distinguir la parte en la acometida, la parte en la LGA, y la parte en las derivaciones individuales e instalación interior.

Se va a estimar la parte correspondiente a la LGA. Usando como aproximación una longitud de LGA de 20 metros (desde la vivienda al CGMP del edificio), con un cable de cobre de 16 mm² y resistividad de 1,72x10⁻⁸ Ω·m, la resistencia del cable es:

$$R = \rho \cdot L / S = 0,0215 \Omega$$

Y, distribuyendo la potencia consumida que circula por la LGA a lo largo del año (8.760 horas en total) en 4 escenarios, descontando casos aislados como picos de más de 10kW:

- 2% del tiempo, consumo pico de 7kW: 1.226 kWh
- 10% del tiempo, consumo elevado de 2,5kW: 2.190kWh
- 38% del tiempo, consumo medio de 600W: 1.997 kWh
- 50% del tiempo, consumo bajo de 200W: 876 kWh

Para cada uno de ellos se calculan las pérdidas como:

$$E_{perd} = P_{perd} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$$

Luego:

- $E_{perd,1} = 3,5 \text{ kWh}$

- $E_{\text{perd},2} = 2,2 \text{ kWh}$
- $E_{\text{perd},3} = 0,5 \text{ kWh}$
- $E_{\text{perd},4} = 0,1 \text{ kWh}$

Consecuentemente, las pérdidas por efecto Joule en la LGA resultarían de 6,3 kWh, que sobre la energía consumida suponen un 0,11%. Por lo tanto, esta medida se traduciría en un ahorro del 0,098% sobre el consumo. Teniendo en cuenta el consumo eléctrico de la instalación, se puede estimar que el impacto de esta propuesta en el **consumo** es de alrededor de **5,6 kWh/año**, y ambientalmente reduce las **emisiones de CO₂** en hasta **2,36 kg al año** (0,1% de las emisiones eléctricas o 0,03% de las emisiones totales).

Cabe recordar que a la hora de distribuir cargas en las tres fases se ha priorizado el equilibrio entre fases conociendo los patrones de uso, minimizando así la potencia contratada. No obstante, también se podría haber ponderado la ubicación de cada equipo, minimizando las longitudes de conductor y logrando una mayor reducción de las pérdidas Joule.

Modelo económico

Esta propuesta ofrece ahorros económicos en forma de reducción del consumo eléctrico. Por otro lado, al mejorar eficiencias y estabilidad, evita posibles averías o fallos en los equipos.

No obstante, se trata de una iniciativa que conlleva una elevada inversión inicial, puesto que requiere rediseñar la instalación interior, DI, y LGA; lo que supone alto CAPEX y tiempo de ejecución.

Debido a la alta variabilidad de los beneficios económicos que ofrece (reducción del consumo y factura), así como su reducido impacto estimado, junto a la variabilidad del CAPEX por la obra, no se ha realizado un modelo económico al uso en este apartado. Tan sólo se tendrá en cuenta su considerable inversión inicial junto a los beneficios en términos de consumo y emisiones.

En definitiva, se trata de una medida que aporta cierta reducción del consumo y de emisiones, pero cuyo impacto (0,03% de ahorro de emisiones) es muy reducido para la complejidad que requiere la instalación en materia de obras. Además, no sirve para reducir la potencia contratada como tal, al aumentarla hasta los 13,5 kW. Sí sirve sin embargo para reducir la cuantía de la factura ligeramente al reducir las pérdidas.

5.6 RESULTADOS Y VIABILIDAD DE LAS PROPUESTAS

Esta sección sintetizará los resultados y conclusiones de cada una de las propuestas analizadas desde un punto de vista energético, ambiental y económico, con el fin de compararlas y crear una matriz de impacto vs riesgo.

Para ello se adjunta una tabla resumen con las principales métricas de cada una de las inversiones estudiadas:

ID	Definición de la propuesta	Reducción consumo energético (kWh/año)	Reducción emisiones CO2 (%)	TIR (%)	Payback period (años)	CAPEX necesario (€)
4.1	Cambio de cerramientos	9.300	27	4,1	20,7	17.620
5.2	Instalación FV	1.622	9	9,7	10,5	2.290
5.3.1	Sustitución unidades AC	400	2,2	0,7	23,1	4.520
5.3.2	Mantenimiento unidades	250	1,4	<0	-	0
5.4	Aeroterminia	14.027	44	0,9	23	11.741
5.5.1	Baterías	0	0,4	1,6	13,3	4.108

Tabla 25. Comparativa de las distintas medidas evaluadas [Elaboración propia]

Como se puede observar, si se opta por comparar la rentabilidad en forma de TIR, la instalación fotovoltaica es la que mayor TIR ofrece con un valor de 9,7%. Además, se trata de la instalación con menor periodo de retorno (10,5 años). En segundo lugar, se encuentran las nuevas ventanas, con una rentabilidad moderada de 4,1%. A continuación, se encuentran el resto de las propuestas, siendo consideradas inversiones de baja rentabilidad (<2%).

En lo energético o ambiental, destaca la aerotermia por su potencial de reducción de las emisiones totales de CO₂ que alcanza el 44% de las emisiones totales actuales. También es muy favorable en este aspecto el cambio de ventanas, con una reducción real del 27% en las emisiones anuales, medido en los últimos dos años.

Y en cuanto a CAPEX necesario, destacan también el cambio de ventanas (17,6 mil euros) y la aerotermia (11,7 mil euros), siendo dos inversiones notables.

La siguiente figura muestra una matriz de impacto en la que el eje vertical representa el impacto ambiental (ahorro de emisiones de CO₂, medido en % respecto a las emisiones totales actuales), el eje horizontal refleja la rentabilidad económica (TIR, %), y el tamaño de los círculos representa de manera proporcional el CAPEX necesario de cada proyecto (a mayor tamaño, mayor riesgo, indicado en miles de euros en cada círculo):

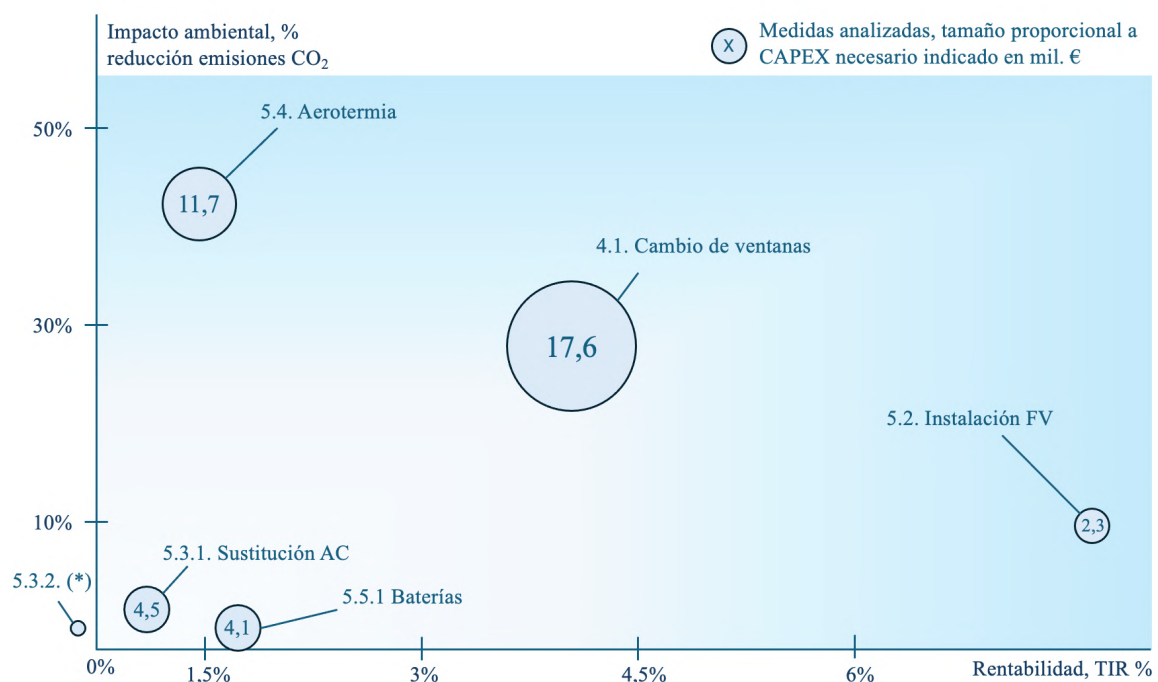


Figura 39. Matriz comparativa impacto de medidas analizadas [Elaboración propia]

De igual manera que se comentaba previamente, se puede inferir que la propuesta 5.2 (FV) destaca por su elevada rentabilidad para un bajo CAPEX, mientras que las propuestas

5.4 (aerothermia) y 4.1 (ventanas) destacan por su elevado impacto ambiental, pero elevado CAPEX.

Por otro lado, la propuesta 5.3.2 (mantenimiento preventivo de las unidades AC) presenta una TIR negativa pero un CAPEX nulo, puesto que además de no requerir inversión, prolonga la vida útil de los equipos evitando así la inversión en nuevas unidades (propuesta 5.3.1).

Para decidir qué medidas ejecutar se han de decidir si se prioriza el impacto económico (5.2), o ambiental (5.4), o una combinación de ambos. Además, hay que ponderar la complejidad de los análisis de sensibilidad e intervalos de confianza desarrollados para cada una de las propuestas.

Por su parte, se puede afirmar que, aunque las propuestas 5.3.1 y 5.3.2 no ofrecen gran atractivo ambiental ni económico, será necesario proceder con una de ellas en el corto plazo. Por su mayor impacto ambiental, y por ser inevitable en el medio plazo, se ha considerado más adecuada la medida 5.3.1, salvo indisponibilidad de capital en cuyo caso será necesario posponerla con la 5.3.2.

Por último, el bajo impacto potencial de la propuesta 5.5.1 (baterías) hace que solo sea realmente atractiva con una posible hibridación con otra propuesta como la 5.2. Los elevados precios de las baterías actualmente minimizan la rentabilidad del aprovechamiento de los ciclos horarios. Y en cuanto a la propuesta 5.5.2 (conexión trifásica), se trata de una propuesta que, si bien es interesante desde el punto de evitar fallos o averías, tiene un impacto muy reducido en el consumo y las emisiones. Además, conlleva una obra compleja de elevado CAPEX.

Comparando los resultados obtenidos con los expuestos por otros autores en el pasado, como los mencionados Barandiarán [4], Fernández Arregui [5], o García Cuenca [6]; si bien el primero de ellos comparte la alta incertidumbre de la rentabilidad de la aerothermia en función de los precios de electricidad y gas, afirma que el cambio de cerramientos es la medida más atractiva económicamente, por encima de la fotovoltaica.

Esto difiere de lo aquí expuesto, principalmente por otorgar un mayor ahorro potencial en el consumo de lo experimentado realmente en esta vivienda.

En su lugar, García Cuenca [6] considera que los paneles solares sin baterías no son viables económicamente, en contraposición a lo aquí expuesto. Tampoco considera viable el triple acristalamiento, con un retorno de 32 años, pero un CAPEX de tan solo 3.200€ (en contraposición con los 20,5 años y 17.600€ reales en esta instalación). Ambas decisiones se entienden por el bajo horizonte de toma de decisiones, de 10 años, en lugar del largo plazo aquí planteado. Asimismo, las baterías consideradas tienen una capacidad muy inferior a las contempladas en este proyecto (5.5.1. *Almacenamiento*), haciendo que la diferencia en el coste de paneles con y sin almacenamiento sea mínima.

Por último, Fernández Arregui [5] en su evaluación conjunta de aerotermia y fotovoltaica, estima una TIR de entorno al 10% para una desinversión de 25.000€, lo cual va más en línea con lo expuesto en este documento.

Capítulo 6. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Este último capítulo buscará cerrar el proyecto, desglosando todo lo aportado en él, conectando los objetivos planteados inicialmente con los resultados obtenidos y analizando en profundidad lo aprendido en el proceso. Además, se comentarán próximos pasos para la continuación futura de lo aquí desarrollado.

6.1 APORTACIONES

En esta sección se incluirán las aportaciones propias del trabajo, explicando su contribución y utilidad.

- **Análisis integral de medidas: enfoque retrospectivo y prospectivo.** Este documento combina un análisis de intervenciones pasadas (ventanas, potencia contratada) y futuras (instalación FV, análisis del AC, etc.) a la hora de analizar energéticamente una instalación. Al no sólo modelar y analizar propuestas hipotéticas, este enfoque permite obtener un diagnóstico más realista y aplicable, basado en datos reales y en estimaciones fundamentadas, ofreciendo una visión más completa y útil para la toma de decisiones en materia energética. Como se ha podido evidenciar, trabajos previos han realizado hipótesis notablemente dispares en cuanto a ahorros potenciales en el consumo, lo cual altera la rentabilidad y el atractivo de las propuestas.
- **Método sistemático para el análisis y evaluación de propuestas energéticas.** Este trabajo aporta un modelo muy secuencial y estructurado para el análisis energético, en el cual se pueden distinguir los siguientes pasos fundamentales: análisis de la situación, identificación de problemas o posibles mejoras, propuesta de soluciones, descripción técnica de las soluciones, impacto (ambiental y económico) de las soluciones, y evaluación de la propuesta. De este modo, el

método propuesto está diseñado para optimizar el análisis y agilizar la toma de decisiones.

- **Consideración de riesgos y amplia sensibilidad para la evaluación de propuestas.** Este documento se distingue por la aplicación de un análisis de sensibilidad exhaustivo a las hipótesis más críticas, permitiendo evaluar una amplia gama de escenarios futuros y sus implicaciones. A diferencia de enfoques que se limitan a estimaciones puntuales, aquí se han considerado variaciones en factores clave, lo que proporciona resultados más realistas y conclusiones mejor fundamentadas.

Esta metodología refuerza la profundidad del estudio y minimiza la incertidumbre en la toma de decisiones energéticas, asegurando que las conclusiones sean coherentes para los diferentes escenarios futuros.

- **Cálculo detallado de la potencia contratada.** Este trabajo desarrolla un método preciso e innovador para determinar la potencia contratada óptima en una vivienda, distinguiéndose de las aproximaciones genéricas y poco detalladas utilizadas habitualmente en calculadoras online o estimaciones estandarizadas. Dicho enfoque se basa en un análisis detallado de los consumos reales, tanto a nivel individual como patrones entre ellos, para segmentar en “circuitos” y calcular los coeficientes de utilización y simultaneidad de manera realista. Este cálculo proporciona una estimación ajustada a la realidad del hogar, evitando sobre costes por sobredimensionamientos innecesarios o riesgos de cortes y daños de equipos por infra dimensionamiento.
- **Propuestas energéticas innovadoras.** Este trabajo aporta un enfoque innovador al explorar soluciones poco convencionales para la optimización energética en viviendas. En lugar de limitarse a intervenciones estándar en el sector, se han analizado alternativas poco convencionales como la reconfiguración de las unidades de aire acondicionado o la optimización de la potencia contratada.

Además, para esta última, se analizan estrategias poco habituales como el uso de baterías o la conexión trifásica.

Estas propuestas, surgidas de un estudio detallado de la vivienda, demuestran que opciones atípicas pueden ser viables y eficientes, ampliando el abanico de estrategias en auditorías energéticas y aportando nuevas lecciones aplicables a otros proyectos residenciales.

6.2 CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

Este proyecto ha cumplido con los objetivos propuestos durante la fase inicial, entre los que destaca el objetivo número cuatro que buscaba proponer modelos de negocio viables y replicables. Esto se debe a que para cada propuesta o intervención se han descrito detalladamente los factores a considerar, creando un método sencillamente replicable que contempla la volatilidad de múltiples variables. Entre los distintos modelos desarrollados, destaca la rentabilidad de la instalación fotovoltaica propuesta, con una TIR del 9,7% para un CAPEX de 2,3 mil euros, o el ya realizado cambio de ventanas con una TIR del 4,1% pese a un elevado CAPEX de 17,6 mil euros.

Por otro lado, el proyecto hace hincapié constantemente en los objetivos 1 y 2, los cuales respectivamente buscaban determinar la eficiencia energética de la instalación y proponer soluciones medioambientalmente favorables. El primero de ellos ha sido la base de los análisis pasados y futuros, ya que se ha estudiado la vivienda en profundidad para tener una imagen fiable de la situación de partida. En línea con esto se ha realizado todo el análisis del consumo e identificación de problemas y oportunidades. En cuanto al segundo, todos los análisis previos y futuros evalúan en detalle la sostenibilidad y cuantifican el impacto en forma de ahorro energético y ahorro de emisiones. En este aspecto destacan las propuestas de la aerotermia (41% de ahorro anual de las emisiones totales) y del cambio de ventanas (27% de ahorro real anual en los últimos dos años).

Por último, este trabajo también ha cumplido con el objetivo número 3, que buscaba determinar de manera precisa patrones de consumo de la instalación, con el fin de entender

las necesidades reales y la potencia contratada. Además, el método desarrollado en las secciones 3.3 y 4.2 se ha descrito de manera sencilla, siendo replicable para cualquier otra vivienda. En el caso en cuestión, el objetivo ha probado que el reciente aumento en la potencia contratada es necesario con el *statu quo* de la vivienda, no habiéndose incurrido por ende en gastos innecesarios.

En lo relacionado con los ODS, el trabajo también se ha alineado con los descritos en el capítulo 1.3. *Alineación con Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)*. En concreto:

- **Objetivo 7 - Energía asequible y no contaminante:** la propuesta de medidas que reduzcan la huella de carbono (sobre todo aerotermia y cambio de ventanas, pero también instalación FV, aire acondicionado más eficiente, etc.) así como el análisis de viabilidad económica contribuyen a la búsqueda de modelos sostenibles, asequibles y verdes.
- **Objetivo 11 - Ciudades y comunidades sostenibles:** al tratarse de una instalación residencial (vivienda plurifamiliar, piso) en Madrid, y haberse detallado los procedimientos, razonamientos e hipótesis a lo largo del proyecto, las propuestas de eficiencia y sostenibilidad son replicables a un gran número de casos, contribuyendo a la creación y consolidación de grandes ciudades y comunidades sostenibles.
- **Objetivo 12 - Producción y consumo responsables:** el trabajo analiza patrones de consumo para detectar ineficiencias que ayuden a reducir la producción, minimizando así el impacto ambiental y los costes para el consumidor. El trabajo realizado ofrece un procedimiento claro de análisis del consumo y áreas de mejora fácilmente replicable.
- **Objetivo 13 - Acción por el clima:** de manera similar a objetivos anteriores, las propuestas se centran en incrementar la eficiencia energética de la instalación y minimizar la huella de carbono, estando por ende alineadas con la lucha contra el cambio climático.

6.3 LECCIONES APRENDIDAS

Esta sección recoge las principales lecciones extraídas a lo largo del desarrollo del proyecto, abarcando aspectos técnicos, personales y generales.

Una de las conclusiones más relevantes ha sido el elevado desconocimiento de la población en materia energética. Durante la fase inicial de investigación y recopilación de información, se evidenció esta carencia a través de conversaciones con los propietarios de la instalación y otros actores clave. Conceptos fundamentales como potencia contratada (kW), energía consumida (kWh), factor de emisiones o factor de simultaneidad resultan desconocidos para una parte significativa de la sociedad. Si se desea conseguir un objetivo global energético, es esencial comenzar con la culturización de conceptos clave.

Asimismo, la comunicación con proveedores de energía, como Iberdrola y CUREnergía, puso de manifiesto la falta de claridad en la transmisión de información, lo que puede derivar en confusión, desinformación e incluso decisiones ineficientes o erróneas. Esta situación subraya la necesidad de mejorar la divulgación y el acceso a información precisa para fomentar la adopción de soluciones energéticas más eficientes y sostenibles.

Otra lección clave ha sido la fuerte dependencia del gas en España en comparación con otros países donde predomina el uso de electricidad. Según IDAE [67], en España el consumo medio anual de gas en calefacción, ACS y cocina para viviendas tipo bloque con gas en la zona continental (meseta central) supone alrededor de 8.496 kWh. Y, como se comentó en el análisis del sector, el consumo anual medio de electricidad es 3.272 kWh. Por lo tanto, el gas representa en torno al 72% del consumo medio. Es importante remarcar que este valor de consumo de gas es para viviendas que disponen de él, ya que como se analizó en el estado de la cuestión el consumo agregado de gas y productos petrolíferos en España es del 40%. Esto se explica por la ausencia de gas en multitud de viviendas españolas.

El caso analizado confirma esta tendencia, con un consumo anual de 18.000 kWh de gas y 5.650 kWh de electricidad, lo que sitúa la proporción del gas en un 76%. Esta elevada presencia del gas en el mix energético evidencia que los avances en generación eléctrica renovable (fotovoltaica, eólica, hidráulica, etc.) son necesarios, pero insuficientes para abordar el desafío climático. Se requieren alternativas que impulsen la electrificación, como la aerotermia, las calderas eléctricas o la integración de gases renovables (hidrógeno, biocombustibles, etc.).

En este contexto, las medidas dirigidas a reducir el uso de gas han demostrado ser las más efectivas en términos de impacto ambiental. Tanto la mejora en las ventanas, que reduce la demanda de calefacción a gas, como la sustitución de la caldera por aerotermia han resultado ser las intervenciones con mayor potencial de reducción de emisiones. Por ello, cualquier estrategia enfocada en la sostenibilidad debe priorizar la transición del gas hacia fuentes de energía más limpias.

Una tercera lección clave extraída del proyecto es la alta variabilidad en la evaluación de propuestas energéticas. Factores como el precio de la electricidad y el gas (€/kWh), los ahorros en el consumo derivados de nuevas tecnologías (%) o incluso condiciones climatológicas externas juegan un papel determinante en la viabilidad de una solución. Como se ha evidenciado a lo largo del documento mediante diversos estudios de sensibilidad, fluctuaciones razonables en estas variables pueden modificar significativamente los resultados de una propuesta. Un ejemplo claro es la rentabilidad de la aerotermia, cuya viabilidad económica varía entre -7,3% (muy poco atractiva) y 9,5% (muy atractiva) en función de la evolución de los precios energéticos contemplados.

Por tanto, una lección fundamental es la necesidad de considerar distintos escenarios futuros y evaluar sus posibles implicaciones antes de tomar decisiones estratégicas en materia energética.

Por último, este trabajo ha servido para darse cuenta del enfoque global e integral de la eficiencia energética y la ingeniería. El éxito de una solución energética no depende solo

de su eficiencia tecnológica, sino de su integración dentro de un enfoque global que combine rentabilidad, accesibilidad, impacto ambiental, confort y diseño, entre otras.

Por ello, la ingeniería no puede verse como un ejercicio aislado de optimización técnica, sino como un proceso integral donde las distintas tecnologías deben complementarse. La fotovoltaica, por sí sola, no garantiza la autonomía energética si no se combina con baterías o estrategias de gestión del consumo. Las ventanas mejoran la eficiencia térmica, pero su impacto depende de cómo interactúan con el sistema de climatización. La aerotermia es una alternativa sostenible, pero su rendimiento varía según el aislamiento y el precio de la electricidad. En definitiva, los proyectos energéticos deben contemplar todas estas dimensiones para ofrecer soluciones equilibradas, accesibles y con un impacto real en la sociedad.

6.4 TRABAJOS FUTUROS

Para concluir el proyecto, se definirán los pasos futuros para ampliar su impacto en el ámbito del consumo y la eficiencia energética.

En el corto plazo, lo primero será implementar las medidas descritas y recomendadas en este documento. Especialmente aquellas consideradas de mayor impacto o atractivo (aerotermia e instalación FV). Tras ello, un paso importante es replicar el análisis de intervenciones pasadas (descrito en la sección 4.1. *Cambio de*) con el objetivo de extraer conclusiones relevantes desde las perspectivas de consumo, económica y ambiental, arrojando más luz sobre el impacto real de cada propuesta.

El siguiente paso será evaluar la validez y adecuación de cada intervención, identificando lecciones aprendidas y ofreciendo recomendaciones para facilitar su adopción. Finalmente, se complementarán los resultados con la detección de nuevos problemas y el planteamiento de posibles soluciones, asegurando así la continuidad del proceso de mejora en el consumo y la eficiencia energética.

Paralelamente, resulta clave evaluar la viabilidad de la complementariedad entre distintas propuestas, como la combinación de la instalación fotovoltaica de autoconsumo con baterías, integrando los análisis de las secciones 5.2 y 5.5.1. Esto permitiría mejorar la resiliencia y flexibilidad del sistema, maximizando el impacto ambiental y económico al no solo aplanar la demanda, sino también cubrir una mayor parte del consumo con generación renovable. Asimismo, la integración de la fotovoltaica con la aerotermia presenta una oportunidad significativa, ya que no solo contribuiría a la reducción del consumo de gas (según lo analizado en la sección 5.4), sino que también permitiría alimentar una significativa mayor proporción del consumo eléctrico con energía renovable.

Por último, se plantea el análisis de otras propuestas identificadas a lo largo del estudio, como el cambio de la tarifa estable a la tarifa con discriminación horaria de tres tramos de Iberdrola, o la unificación de los sistemas de calefacción y refrigeración mediante una única bomba de calor. Esta última alternativa resulta especialmente interesante desde el punto de vista energético y económico; no obstante, supondría un sacrificio en términos de confort, al sustituir dos soluciones especializadas —refrigeración por conductos y calefacción mediante radiadores— por un sistema único.

Para garantizar que la totalidad de este proyecto y sus propuestas sean útiles en otros casos, y cumplir con los objetivos de educación energética y replicabilidad, es fundamental preservar el modelo desarrollado en este documento. La estructura planteada, basada en descripción técnica, dimensionamiento, impacto en el consumo y medioambiente, modelo económico y análisis de resultados, permite un enfoque sistemático y aplicable a diferentes escenarios.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.S. Energy Information Administration (EIA). (Junio de 2024). “Electricity generation from renewables surpassed coal for the first time in 2021”.
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=62203> [Accedido: 26 de septiembre de 2024].
- [2] Maygmo, (abril de 2024). “Evolución precio de la luz en España desde 2020 hasta 2024”. Disponible en: <https://maygmo.es/explora-la-evolucion-del-precio-de-la-luz-en-espana-desde-2020-hasta-2024/> [Accedido: 28 de septiembre de 2024]
- [3] OMS. (Diciembre de 2022). “Contaminación del aire ambiente (exterior)”. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) [Accedido: 28 de septiembre de 2024]
- [4] L. Barandiarán Iturmendi, “Proyecto de optimización energética en una vivienda residencial” TFM, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, 2023.
- [5] I. Fernández Arregui, “Eficiencia energética de una vivienda unifamiliar” TFG, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, 2023.
- [6] D. García Cuenca, “Análisis energético de una vivienda: enfoque técnico y económico financiero” TFM, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, 2018.
- [7] European Commission. (Junio de 2024). “Energy consumption in households”. Eurostat. Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households [Accedido: 02 de octubre de 2024]
- [8] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). 2024. “Estadística Anual Consumo Energético Residencial 2022”.
- [9] Red Eléctrica Española (REE). (Marzo de 2024). “España pone en servicio en 2023 la mayor cifra de potencia instalada solar fotovoltaica de su historia”. Disponible en: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2024/03/espana-pone-en-servicio-en-2023-la-mayor-cifra-de-potencia-instalada-solar-fotovoltaica-de-su-historia> [Accedido: 03 de octubre de 2024]
- [10] Red Eléctrica Española (REE). (Abril de 2022). “¿Cómo calcular el consumo eléctrico de una casa?”. Disponible en: <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/luz/calcular->

- consumo-electrico-
casa#:~:text=Seg%C3%BAn%20Red%20El%C3%A9ctrica%20Espa%C3%B1ola%20(RE
E,Espa%C3%B1a%20(2020%2D2019 [Accedido: 05 de octubre de 2024]
- [11] IEA (2022). “Annual global primary energy intensity improvement by scenario, 2001-2030”. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-global-primary-energy-intensity-improvement-by-scenario-2001-2030>
- [12] Ministerio de Derechos sociales, Consumo, y Agenda 2030. “Gasto energético en el hogar”. Disponible en: [https://consumopolis.consumo.gob.es/fichas-pedagogicas/gasto-energetico-en-el-hogar#:~:text=Las%20viviendas%20unifamiliares%20\(casas%20aisladas,de%20viviendas%20\(7.544%20kWh](https://consumopolis.consumo.gob.es/fichas-pedagogicas/gasto-energetico-en-el-hogar#:~:text=Las%20viviendas%20unifamiliares%20(casas%20aisladas,de%20viviendas%20(7.544%20kWh) [Accedido: 06 de octubre de 2024]
- [13] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). “Marco legislativo 2030: el paquete de invierno”. Disponible en: <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/marco-legislativo-2030-el-paquete-de-invierno> [Accedido: 08 de octubre de 2024]
- [14] REN30. (Noviembre de 2021). “Ejemplo de un certificado energético”. Disponible en: <https://ren30.es/rehabilitacion-energetica/certificados-energeticos/ejemplo-de-un-certificado-energetico/>. [Accedido: 12 de octubre de 2024].
- [15] KM2. (Mayo de 2023). “Consumo asociado a la letra del certificado de eficiencia energética”. Disponible en: <https://km2.es/consumo-asociado-letra-certificado-eficiencia-energetica/>. [Accedido: 10 de octubre de 2024].
- [16] GBCE. (Marzo de 2023). “Todas las viviendas de España deberán tener como mínimo un certificado de eficiencia ‘D’ en 2033”. Disponible en: <https://gbce.es/todas-las-viviendas-de-espana-deberan-tener-como-minimo-un-certificado-de-eficiencia-d-en-2033/>. [Accedido: 10 de octubre de 2024]
- [17] Agencia Europea de Medio Ambiente, (septiembre de 2024). "Consumo de energía primaria y final en Europa". EEA. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/primary-and-final-energy-consumption-10>. [Accedido: 16 de octubre de 2024].
- [18] EAPN. (Febrero de 2025). “La pobreza energética ha aumentado un 196% desde 2008”. Disponible en: <https://www.eapn.es/noticias/1826/la-pobreza-energetica-ha-aumentado-un-196-desde-2008> [Accedido: 08 de octubre de 2024].

- [19] Parlamento Europeo (Marzo de 2023). "Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector". [europarl.europa.eu](https://www.europarl.europa.eu). Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>. [Accedido: 10 de octubre de 2024].
- [20] Naciones Unidas. "Las ciudades y la contaminación". United Nations. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/climate-solutions/cities-pollution#:~:text=Las%20ciudades%20son%20uno%20de,la%20superficie%20de%20la%20Tierra>. [Accedido: 10 de octubre de 2024].
- [21] M. Rodríguez. (Marzo de 2024). "La UE confirma el fin de la calefacción por gas natural en 2040 y el sector advierte del desafío para España". Libre Mercado. Disponible en: <https://www.libremercado.com/2024-03-14/la-ue-confirma-el-fin-de-la-calefaccion-por-gas-natural-en-2040-y-el-sector-advierte-del-desafio-para-espana-7107744/>. [Accedido: 11 de octubre de 2024].
- [22] Samsung. (Junio de 2024). "Samsung lidera la innovación tecnológica en el hogar con nueva línea de electrodomésticos Bespoke AI". Samsung News. Disponible en: <https://news.samsung.com/cl/samsung-lidera-la-innovacion-tecnologica-en-el-hogar-con-nueva-linea-de-electrodomesticos-bespoke-ai>. [Accedido: 11 de octubre de 2024]
- [23] H100 Fife. "H100 Fife: About H100 Fife." Disponible en: <https://www.h100fife.co.uk/> [Accedido: 07 de octubre de 2024].
- [24] Endesa. (Marzo de 2023). "Aumento del autoconsumo fotovoltaico en España: datos y razones". Disponible en: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/aumento-autoconsumo-fotovoltaico-espana>. [Accedido: 13 de octubre de 2024].
- [25] M. Lempriere. "Solar PV costs fall 82% over the last decade, says IRENA". *Solar Power Portal*. Junio 2020. Disponible en: https://www.solarpowerportal.co.uk/solar_pv_costs_fall_82_over_the_last_decade_says_irena/. [Accedido: octubre 2024].
- [26] Ecoinventos, "Zecub, la microcentral hidroeléctrica doméstica de 7 kWh que genera electricidad con agua del grifo". Julio 2024. Disponible en: <https://ecoinventos.com/zecub/> [Accedido en: octubre 2024]
- [27] EnergyGo, "Consumo de tiras Led: ¿cuánto consumen y que tipos hay?". Junio 2024. Disponible en: <https://blog.energygo.es/cuanta-energia-consumen-las-tiras-de-led-y-que-tipos->

- hay/#:~:text=Su%20consumo%20es%20de%2014.4%20W%2Fm%2C%20aproximadame
nte. [Accedido en: octubre 2024]
- [28] Naturgy, “¿Qué es el consumo fantasma de electricidad y cómo evitarlo?”. Abril 2024.
Disponible en:
https://www.naturgy.es/blog/hogar/que_es_el_consumo_fantasma_de_electricidad_y_como_evitarlo#:~:text=Seg%C3%BAn%20el%20Instituto%20para%20la,quando%20no%20los%20est%C3%A9s%20utilizando. [Accedido en: octubre 2024]
- [29] Kirk, K. and Climate Cardinals. Julio 2023. “La pérdida de energía es el componente más grande del sistema eléctrico”. Yale Climate Connections. Disponible en:
<https://yaleclimateconnections.org/2023/07/la-perdida-de-energia-es-el-componente-mas-grande-del-sistema-electrico/> [Accedido en: octubre 2024]
- [30] Red Eléctrica Española (REE), “Las energías renovables general el 56% del ‘mix’ eléctrico español en 2024”. Diciembre 2024. Disponible en: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2024/12/las-energias-renovables-generan-el-56-del-mix-electrico-espanol-2024> [Accedido en: diciembre 2024].
- [31] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Ministerio de Fomento. “Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España”. Abril 2016.
- [32] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y Oficina Española de Cambio Climático (OECC). “Factores de emisión 2007-2023”.
- [33] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). “Avances climatológicos mensuales” por Comunidad, para la estación Madrid Retiro.
- [34] Ottawa Window Medics. “What’s the lifespan of different types of window glass?”. Disponible en: <https://ottawa.windowmedics.com/blog/whats-the-lifespan-of-different-types-of-window-glass/#:~:text=While%20single%2Dpane%20glass%20may,and%20longevity%20when%20maintained%20correctly>. [Accedido en: noviembre 2024]
- [35] Instituto Nacional de Estadística (INE), “Cálculo de variaciones del Índice de Precios de Consumo: noviembre 2014 a noviembre 2024”. Disponible en:
<https://www.ine.es/varipc/verVariaciones.do?idmesini=11&anyoini=2014&idmesfin=11&anyofin=2024&ntipo=1&enviar=Calcular> . [Accedido en: noviembre 2024]

- [36] Investing.com, “Rentabilidad del bono español a 30 años”. Disponible en: <https://es.investing.com/rates-bonds/spain-30-year-bond-yield> [Accedido en: noviembre 2024]
- [37] Fundeen, “¿Es rentable invertir en energías renovables?”. Disponible en: <https://www.fundeen.com/blog-energias-renovables/es-rentable-invertir-en-energias-renovables> [Accedido en: noviembre 2024]
- [38] Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), RD 842/2002.
- [39] Naturgy, septiembre 2023. “Potencia contratada en el hogar”. Disponible en: https://www.naturgy.es/hogar/blog/potencia_contratada_en_el_hogar. [Accedido en: noviembre 2024]
- [40] Iberdrola, “Calcula la potencia eléctrica óptima de tu hogar”. Disponible en: https://www.naturgy.es/hogar/blog/potencia_contratada_en_el_hogar [Accedido en: noviembre 2024]
- [41] Balay, especificaciones técnicas lavavajillas 3VF301NP. Disponible en: <https://www.balay.es/catalogo-electrodomesticos/3VF301NP#/Tabs=section-highlights/Togglebox=manuals/Togglebox=accessoriesOthers/> [Accedido en: noviembre 2024]
- [42] Rowenta, especificaciones técnicas plancha de vapor Focus Excel. Disponible en: <https://www.rowenta.es/p/focus-excel/1830031671> . [Accedido en: noviembre 2024]
- [43] IRENA, “Renewable Power Generation Costs in 2023”.
- [44] Powen, julio 2023. “¿Cuántas horas de sol hay en España por provincias?”. Disponible en: <https://powen.es/numero-horas-solares-en-espana/> [Accedido en: diciembre 2024]
- [45] Lumeras, A., septiembre 2024. “¿Cuánto tiempo se tarda en instalar placas solares en un tejado?”. Sunhero. Disponible en: <https://www.sunhero.com/blog/cuanto-tiempo-se-tarda-en-instalar-placas-solares-en-un-tejado/#:~:text=Montaje%20de%20las%20placas%20solares,-Una%20vez%20recibidos&text=El%20montaje%20requiere%20de%201%20a%202%20d%C3%ADas%20como%20m%C3%A1ximo>. [Accedido en: diciembre 2024]
- [46] Tornasol Energy: vertido cero. Disponible en: https://www.tornasol.energy/products/vertido-cero?srltid=AfmBOoo0YI-cJr6fV0btPgDPLX4ExUU8FK_MtcZ4jO1QOiKfqmEvkIDD [Accedido en: diciembre 2024]

- [47] Autosolar. “¿Cuánto cuesta una instalación fotovoltaica?”. Disponible en: <https://autosolar.es/mi-experiencia-placas-solares/cuanto-cuesta-una-instalacion-fotovoltaica> [Accedido en: diciembre 2024]
- [48] Energytec Power Systems: memoria técnica de diseño. Disponible en: https://energytec.es/servicios/119-memoria-tecnica-de-diseno.html?srsltid=AfmBOokrh0V7fysehtceGGr8QtNNJ_GJLA2ZVWBbJFpHbgdSmulhMu [Accedido en: diciembre 2024]
- [49] Grupo Eco I Sos: certificado fin de obra. Disponible en: <https://www.grupoecoisos.com/product/16082783/certificado-de-fin-de-obra?srsltid=AfmBOop-cS1ZB88ioVCJyQmdCH9NwCQz64HfvoO2WaxfzuXOMSfQOg7o> [Accedido en: diciembre 2024]
- [50] Habitissimo, “Precio legalizar placas solares: ¿cuánto cuesta y cómo hacerlo?”. Disponible en: <https://www.habitissimo.es/presupuestos/legalizar-placas-solares> [Accedido en: diciembre 2024]
- [51] Enver, “¿Cuánto cuesta el mantenimiento de las placas solares?”. Disponible en: <https://enver.es/cuanto-cuesta-el-mantenimiento-de-las-placas-solares/#:~:text=El%20coste%20aproximado%20de%20un,%E2%82%AC%20si%20se%20contrata%20anualmente.> [Accedido en: diciembre 2024]
- [52] Bloomberg New Energy Finance, Schneider Electric, septiembre 2021. “Realizing the Potential of Customer-Sited Solar”. Disponible en: <https://www.pv-magazine.es/2021/09/22/el-autoconsumo-fotovoltaico-se-amortiza-en-espana-en-unos-6-7-anos/> [Accedido en: enero 2025]
- [53] Hilcu, M. enero 2025. “¿Son rentables las placas solares para el autoconsumo?”. Otovo. Disponible en: <https://www.otovo.es/blog/autoconsumo/rentabilidad-de-placas-solares/> [Accedido en: enero 2025]
- [54] Mitsubishi Electric. “HVAC Maintenance Tips to Ensure Equipment Longevity and Efficiency”. Mayo 2024. Disponible en: <https://www.mitsubishicomfort.com/articles/hvac-maintenance-tips> [Accedido en: enero 2024]
- [55] Enel. “Mantenimiento de aire acondicionado: guía práctica para que funcione al 100% este verano”. Noviembre 2022. Disponible en: <https://www.enelxstore.com/cl/es/blog/Mantenimiento-de-aire-acondicionado> [Accedido en: febrero 2025]

- [56] Chronosare. “¿Cuánto cuesta el mantenimiento del aire acondicionado?”. Febrero 2025. Disponible en: <https://www.cronoshare.com/cuanto-cuesta/mantenimiento-aire-acondicionado> [Accedido en: febrero 2025]
- [57] Synecore. “Heating, Ventilation and Air Conditioning Maintenance Saves Energy – Cuts Bills”. Disponible en: <https://www.synecore.co.uk/heating-ventilation-and-air-conditioning-maintenance-saves-energy-cuts-bills/> [Accedido en: febrero 2025]
- [58] Inditer. “¿Qué es la aerotermia?”. Disponible en: <https://inditer.es/blog/que-es-la-aerotermia/> [Accedido en: febrero 2025]
- [59] Eurovent Certified Performance. “Dimensionamiento de sistemas de bombeo de calor”. Mayo 2020. Disponible en: <https://www.eurovent-certification.com/es/category/article/dimensioning-of-heat-pump-systems?universe=energy-efficiency> [Accedido en: febrero 2025]
- [60] U.S. Energy Information Administration. “Energy, Economic, and Environmental Assessment of U.S. LNG Exports”. Diciembre 2024.
- [61] BBVA Research. “España | Más renovables para seguir bajando costes”. Febrero 2025.
- [62] Iberdrola. “¿Qué tipos de baterías para placas solares existen?”. Octubre de 2023. Disponible en: <https://www.iberdrola.es/eu/blog/autoconsumo/tipos-de-baterias-para-placas-solares> [Accedido en: marzo 2025]
- [63] Chawla, Neha & Bharti, Neelam & Singh, Shailendra. (2019). “Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries”. Batteries. 5. 10.3390/batteries5010019.
- [64] Aleasoft Energy Forecasting. “La demanda es inteligente y se adapta a los cambios del perfil de precios”. Julio 2023. Disponible en: <https://aleasoft.com/es/demanda-inteligente-adapta-cambios-perfil-precios/> [Accedido en: marzo 2025]
- [65] OMIE. Mercado diario: negociación por tecnologías. Disponible en: <https://www.omie.es/es/market-results/daily/daily-market/trading-by-technology?scope=daily&date=2024-01-24&system=9>
- [66] De Gracia Navarro, R. (2008). “La eficiencia en las redes: niveles de pérdidas y reducción de fraude energético”. Autoridad Nacional de Servicios Públicos de Panamá.
- [67] IDAE. 2019. “Estudio Spahousec II: Análisis estadístico del consumo de gas natural en las viviendas principales con calefacción individual”.

ANEXO I

SUNPOWER | FROM MAXEON
SOLAR TECHNOLOGIES

MAXEON 6 AC PANEL SOLAR

420-440 W | Hasta un 22,8 % de eficiencia

 Microinversor integrado
de fábrica

 Marco negro, lámina
trasera blanca

Más energía de por vida

Diseñado para maximizar la generación de energía mediante una eficiencia líder del sector, un desempeño mejorado a altas temperaturas y una mayor conversión de energía en condiciones de poca luz, como por la mañana, por la noche y en días nublados.

Fiabilidad sin concesiones

Diseñado para funcionar en todo tipo de condiciones meteorológicas con células anti-grietas y conexiones reforzadas que protegen frente al desgaste y la corrosión. El microinversor de cada panel permite su funcionamiento independiente para mitigar el impacto de la sombra al tiempo que mejora el desempeño del sistema.



Sostenibilidad superior

Los ingredientes limpios, la fabricación responsable y la producción de energía duradera para 40 años hacen de los paneles SunPower Maxeon la opción más sostenible del sector de la energía solar.



La garantía más larga del sector

Los paneles SunPower Maxeon están cubiertos por una garantía de 40 años¹ respaldada por exhaustivas pruebas de terceros y datos de campo de más de 33 millones de paneles desplegados en todo el mundo.

Cobertura de producto y de potencia	40 años
Salida mínima garantizada año 1	98,0%
Degradación máxima anual	0,25%
Garantía de producto limitada del microinversor de Enphase	25 años



Más información sobre SPR-MAX6-XXX- E3-AC
sunpower.maxeon.com



MAXEON 6 AC POTENCIA: 420-440 W | EFICIENCIA: Hasta un 22,8%

Datos eléctricos de CA	
Modelo de inversor: IQ 7A	A 230 V CA
Potencia máxima de salida	366 VA
Máx. potencia de salida continua	349 VA
Rango/Tensión nom. (L-N)	219 – 264 V
Máx. corriente de salida continua	1,52 A
Máx. unidades por circuito derivado de 20 A (L-N)	10
Eficiencia ponderada ²	96,5%
Frecuencia nominal	50 Hz
Rango de frecuencia ampliado	45-55 Hz
Corriente de fallo de cortocircuito de CA durante 3 ciclos	5,8 A rms
Puerto de CA de clase de sobretensión	III
Corriente de retroalimentación del puerto de CA	18 mA
Ajuste del factor de potencia	1,0
Factor de potencia (ajustable)	0,8 adelanto/0,8 retardo

Datos de alimentación de CC				
	SPR-MAX6-440-E3-AC	SPR-MAX6-435-E3-AC	SPR-MAX6-425-E3-AC	SPR-MAX6-420-E3-AC
Potencia nominal ³ (P _{nom})	440 W	435 W	425 W	420 W
Tol. de potencia	+5/0%	+5/0%	+5/0%	+5/0%
Eficiencia del módulo	22,8%	22,5%	22,0%	21,7%
Coef. temp. (Potencia)	-0,29%/°C			
Tol. de sombra	Seguimiento del punto de máxima potencia del nivel del módulo integrado			

Datos mecánicos	
Células solares	66 células monocristalinas Maxeon Generación 6
Cristal frontal	Cristal templado antirreflejos de gran transmisividad
Clasificación ambiental	Microinversor con clasificación para exteriores - IP67 (UL: NEMA tipo 6)
Marco	Anodizado negro de clase 1
Peso	21,8 kg

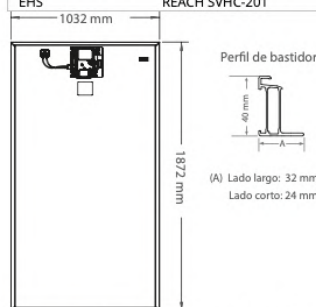


- 1 La garantía de 40 años no está disponible en todos los países ni para todas las instalaciones y requiere registro; de lo contrario, se aplica nuestra garantía de 25 años.
2 Probado según EN 50530 (UE).
3 Condiciones de prueba estándar (irradiancia de 1000 W/m², AM 1,5, 25 °C). Estándar de calibración de NREL: intensidad según SOMS, tensión según LACCS FF. Toda la tensión de CC está totalmente contenida dentro del módulo.
4 Factor de seguridad 1,5 incluido.
5 Los módulos de CA deben conectarse al hardware de control Enphase (ENVOY) para habilitar la garantía de producto Enphase.
6 Consulte el módulo DC, calificación antiincendios de clase C según IEC 61730.
7 Paneles degradados un 0 % en pruebas LeTID extendidas realizadas por PVEL. Informe de prueba R10124977G-1, 2020.

Fabricado en Malasia (células)
Montado en Malasia (módulos)
Las especificaciones incluidas en esta ficha técnica están sujetas a cambios sin previo aviso.
© 2022 Maxeon Solar Technologies, Ltd. Todos los derechos reservados.
Consulte la información sobre la garantía, patentes y marcas comerciales en maxeon.com/legal.

Condiciones de funcionamiento probadas	
Temperatura de funcionamiento	De -40 °C a +60 °C
Máx. temperatura ambiente	50 °C
Humedad relativa	Del 4 % al 100 % (con condensación)
Máx. altitud	2000 m
Carga de diseño ⁴	Viento: 3600 Pa, 367 kg/m² en cara posterior
	Nieve: 5400 Pa, 551 kg/m² en cara frontal
Resistencia a impactos	Granizo de 25 mm de diámetro a 23 m/s
Carcasa del microinversor	Carcasa polimérica clase II, doble aislamiento, resistente a la corrosión

Garantías, certificaciones y conformidad	
Garantías ¹	Garantía de potencia limitada durante 40 años
	Garantía de producto limitada durante 40 años
Garantía de microinversores	Garantía de producto limitada durante 25 años cubierta por la garantía Enphase ⁵
	IEC 61215, 61730 ⁶
Certificaciones y conformidad	IEC 62109-1, 62109-2
	IEC 61000-6-3
Certificados de gestión de calidad	AS4777.2, RCM
	IEC/ EN 50549-1:2019, G98/G99
Prueba PID (degradación inducida por potencial)	VDE-AR-N-4105
	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
Prueba LeTID	1000 V: IEC 62804
Normas disponibles	Versión preliminar IEC 61215 ⁷
Contribución a la certificación del Green Building Council	TUV ⁸ , EnTest
Conformidad con EHS	Los paneles pueden aportar puntos adicionales para la obtención de las certificaciones LEED y BREEAM
	RoHS, OHSAS 18001:2007, REACH SVHC-201



Veillez lire les instructions de sécurité et d'installation.
Veillez consulter
www.sunpower.maxeon.com/int/PVInstallGuideIEC.
La version papier peut être demandée à l'adresse suivante :
supportetecnico@maxeon.com.

SUNPOWER
FROM MAXEON SOLAR TECHNOLOGIES

544435 REV A / A4_ES
Fecha de publicación: Enero 2022

ANEXO II

Air Conditioning

Product Information

PKA-M R32 Power Inverter Heat Pump
Wall Mounted System
(Single Phase)

Making a
World of
Difference



The PKA-M Power Inverter range is a wall mounted system that blends a host of outstanding features with a sophisticated streamlined design. Offering high seasonal efficiency, advanced control options and extended pipe runs, this range is extremely flexible and utilises low GWP R32 refrigerant.

Key Features

- Flat panel, compact design
- Improved airflow control, including adjustable louvres for uniform air distribution
- Internal pipe connection to wall mounted unit for easy and neat installation
- Highly energy efficient operation, utilising low GWP R32 refrigerant
- Quiet operation with industry leading low noise levels
- CN22 connector as standard for connection to PAR-33MAA hard wired controller
- Full heating capacity down to -3°C
- 100m pipe run (Size 100)
- Replace Technology available



Air Conditioning | Heating
Ventilation | Controls



Air Conditioning

Product Information

PKA-M R32 Power Inverter Heat Pump
Wall Mounted System
(Single Phase)

Making a
World of
Difference

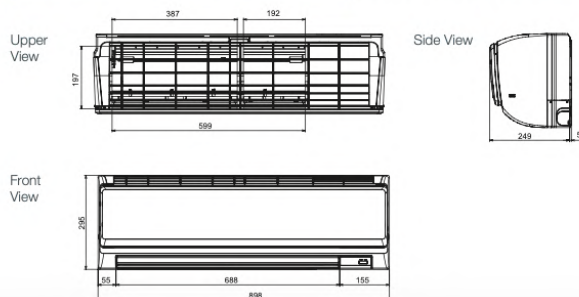


PKA-M - INDOOR UNITS		PKA-M35HA	PKA-M50HA	PKA-M60KA	PKA-M71KA	PKA-M100KA
CAPACITY (kW)	Heating (nominal)	4.1 (1.6-5.2)	5.0 (2.5-7.3)	7.0 (2.8-8.2)	8.0 (3.5-10.2)	11.2 (4.5-14.0)
	Cooling (nominal)	3.6 (1.6-4.5)	4.6 (2.3-5.6)	6.1 (2.7-6.7)	7.1 (3.3-8.1)	9.5 (4.9-11.4)
COP / EER (nominal)		3.94 / 4.14	3.71 / 3.71	4.04 / 3.91	3.78 / 3.81	3.61 / 3.95
SCOP / SEER (BS EN14825)		4.0 / 6.3	4.1 / 6.4	4.2 / 6.8	4.3 / 6.8	4.4 / 6.5
ERP ENERGY EFFICIENCY CLASS	Heating/Cooling	A+ / A++	A+ / A++	A+ / A++	A+ / A++	A+ / A++
AIRFLOW (l/s)	Lo-Mi-Hi	150-175-200	150-175-200	300-333-367	300-333-367	333-383-433
PIPE SIZE MM (in)	Gas	12.7 (1/2")	12.7 (1/2")	15.88 (5/8")	15.88 (5/8")	15.88 (5/8")
	Liquid	6.35 (1/4")	6.35 (1/4")	9.52 (3/8")	9.52 (3/8")	9.52 (3/8")
SOUND PRESSURE LEVEL (dBA)	Lo-Mi-Hi	36-40-43	36-40-43	39-42-45	39-42-45	41-45-49
SOUND POWER LEVEL (dBA)		60	60	64	64	65
DIMENSIONS (mm)	Width x Depth x Height	898 x 249 x 295	898 x 249 x 295	1170 x 295 x 365	1170 x 295 x 365	1170 x 295 x 365
WEIGHT (kg)		13	13	21	21	21
ELECTRICAL SUPPLY		Fed by Outdoor Unit	Fed by Outdoor Unit	Fed by Outdoor Unit	Fed by Outdoor Unit	Fed by Outdoor Unit
FUSE RATING (BS88) - HRC (A)		6	6	6	6	6
INTERCONNECTING CABLE NO. CORES		4	4	4	4	4
WIRED REMOTE CONTROLLER REFERENCE		PAR-33MAA	PAR-33MAA	PAR-33MAA	PAR-33MAA	PAR-33MAA

PUZ-ZM - OUTDOOR UNITS		PUZ-ZM35VKA	PUZ-ZM50VKA	PUZ-ZM60VKA	PUZ-ZM71VKA	PUZ-ZM100VKA
SOUND PRESSURE LEVEL (dBA)	Heating/Cooling	46 / 44	46 / 44	49 / 47	49 / 47	51 / 49
SOUND POWER LEVEL (dBA)	Cooling	65	65	67	67	69
WEIGHT (kg)		46	46	70	70	116
DIMENSIONS (mm)	Width x Depth x Height	809 x 300 x 630	809 x 300 x 630	950 x 330 + 25 x 943	950 x 330 + 25 x 943	1050 x 330 + 40 x 1338
ELECTRICAL SUPPLY		220-240v, 50Hz	220-240v, 50Hz	220-240v, 50Hz	220-240v, 50Hz	220-240v, 50Hz
PHASE		Single	Single	Single	Single	Single
SYSTEM POWER INPUT (kW)	Heating/Cooling (nominal)	1.040 / 0.869	1.347 / 1.239	1.732 / 1.560	2.116 / 1.863	3.102 / 2.405
FUSE RATING (BS88) - HRC (A)		16	16	25	25	32
MAINS CABLE NO. CORES		3	3	3	3	3
MAX PIPE LENGTH (m)		50	50	55	55	100
MAX HEIGHT DIFFERENCE (m)		30	30	30	30	30
CHARGE REFRIGERANT (kg) / CO ₂ EQUIVALENT (t)	R32 (GWP 675) - 30m	2.0 / 1.35	2.00 / 1.35	2.80 / 1.89	2.80 / 1.89	4.00 / 2.70
MAX ADDITIONAL REFRIGERANT (kg) / CO ₂ EQUIVALENT (t)	R32 (GWP 675)	0.30 / 0.20	0.30 / 0.20	0.80 / 0.54	0.80 / 0.54	2.80 / 1.89

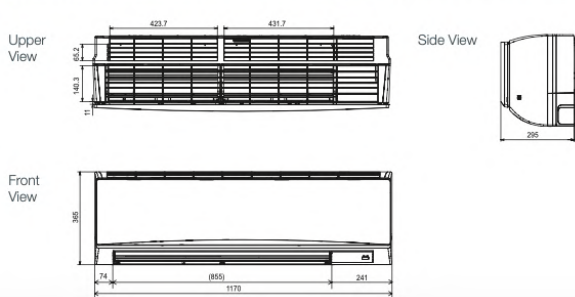
PRODUCT DIMENSIONS

PKA-M35/50HA



PRODUCT DIMENSIONS

PKA-M60-100KA



ANEXO III



R410 Alta capacidad (22kW ~ 25kW)



16,00 kW
14,00 kW



25,00 kW
22,00 kW



23,00 kW
20,00 kW



Unidades exteriores trifásicas

MODELO			PUHZ-SW160YKA(-BS)	PUHZ-SW200YKA(-BS)	PUHZ-SHW230YKA2
TECNOLOGÍA			POWER INVERTER	POWER INVERTER	ZUBADAN
Calefacción	A7W35 (min - nom - max)	kW	5,8 - 22,0 - 27,7	5,8 - 25,0 - 30,1	11,4 - 23,0 - 28,0
		COP	4,20	4,00	3,65
	Clase energética	W35 / W55	A++ / A++	A++ / A++	A++ / A++
	SCOP clima cálido*	W35 / W55	5,45 / 3,88	5,35 / 3,78	5,13 / 3,83
	SCOP clima medio*	W35 / W55	4,15 / 3,23	4,18 / 3,30	4,20 / 3,28
Refrigeración	A2W35	kW / COP	16,0 / 3,11	20,0 / 2,80	23,0 / 2,37
	A-7W35	kW / COP	13,4 / 2,80	15,3 / 2,67	23,0 / 2,85
	A35W7	kW / EER	16,0 / 2,76	20,0 / 2,25	20,0 / 2,22
	A35W18	kW / EER	18,0 / 4,56	22,0 / 4,10	20,0 / 3,55
Rango de funcionamiento	Calor	°C	-20 — +21	-20 — +21	-25 — +21
	ACS	°C	-20 — +35	-20 — +35	-25 — +35
	Frio	°C	-15 — +46	-15 — +46	-5 — +46
Salida de agua	máx calor / mín frío	°C	+60 / +5	+60 / +5	+60 / +5
Dimensiones	Al. x An. X Fo.	mm	1338 x 1050 x 330	1338 x 1050 x 330	1338 x 1050 x 330
	Peso neto	kg	136	136	149
Ventilador	Caudal de aire	m³/min	140	140	140
Nivel sonoro	SPL (Calor/Frío)	dB	62	62	59 / 58
	PWL (Calor)	dB	78	78	75
Tuberías frigoríficas	Ø Líquido / Gas	mm	9,52 (3/8") / 25,40 (1")	12,70 (1/2") / 25,40 (1")	12,70 (1/2") / 25,40 (1")
	L. máx / Altura máx.	m	80 / 30	80 / 30	80 / 30
Gas refrigerante R410A (GWP 2088)	Precarga (kg / m / t CO ₂ Eq.)		7,1 / 30 / 14,83	7,7 / 30 / 16,08	7,7 / 30 / 16,08
	Carga máx (kg / m / t CO ₂ Eq.)		11,1 / 80 / 23,18	12,9 / 80 / 26,94	12,9 / 80 / 26,94
Datos eléctricos	Corriente máxima	A	19	31	26
Circuito primario	Caudal de agua	L/min	23,0 — 63,1	28,7 — 71,7	28,7 — 65,9
	Vol. mín. adicional***	L	18	24	28
PVR	Trifásica	€	6.327 €	7.518 €	9.500 €
	Trifásica -BS	€	6.627 €	7.818 €	--

* Datos de eficiencia energética para combinaciones con Hydrobox ERSE.**D.

*** Volumen mínimo adicional para zonas climáticas media y cálida según la directiva 2009/125/EC y el reglamento UE N° 813/2013

Unidades con terminación -BS solo disponibles bajo pedido.

Tablas de capacidad y eficiencia energética a partir de la página 56.



Unidades interiores

MODELO		ERSE-MED	ERSE-YM9ED	EHSE-YM9ED
Volumen acumulador ACS	L	--	--	--
Exteriores compatibles	PUHZ-SW160/200	•	•	•
	PUHZ-SHW230	•	•	•
Modos de trabajo		Frío / Calor	Frío / Calor	Calor
Dimensiones (Al. x An. X Fo.)	mm	950 x 600 x 360	950 x 600 x 360	950 x 600 x 360
Peso vacío/lleño	kg	62 / 72	64 / 74	64 / 74
Resistencia de apoyo (Fases / Capacidad)		--	3~ / 3+6kW	3~ / 3+6kW
Nivel sonoro	db(A)	45	45	45
Tuberías	Impuls. y ret. primario	G1-1/2 roscado	Ø28 compresión	Ø28 compresión
	Drenaje de condensados	Ø20 (ext)	Ø20 (ext)	--
	Ø Líquido / Gas	9,52 (3/8") / 25,4 (1")	9,52 (3/8") / 25,4 (1")	9,52 (3/8") / 25,4 (1")
ACS: Clase energética / Perfil		--	--	--
PVR		€ 4.120 €	4.223 €	3.914 €

Combinaciones recomendadas

	SISTEMA DE PRODUCCIÓN			ACCESORIOS OPCIONALES			Total PVR
22kW	Unidad exterior 22kW	PUHZ-SW160YKA	6.327 €	Interfaz WiFi	MAC-567IF-E	99 €	10.649 €
	Hydrobox	ERSE-YM9ED	4.223 €				
25kW	Unidad exterior 25kW	PUHZ-SW200YKA	7.518 €	Interfaz WiFi	MAC-567IF-E	99 €	11.840 €
	Hydrobox	ERSE-YM9ED	4.223 €				
23kW (ZD)	Unidad exterior 23kW	PUHZ-SHW230YKA2	9.500 €	Interfaz WiFi	MAC-567IF-E	99 €	13.839 €
	Hydrobox	ERSE-YM9ED	4.223 €	Adaptador T. Líquido	PAC-SG73RJ-E	17 €	

ANEXO IV

BATTERY-BOX PREMIUM HVS / HVM

- Capable of High-Powered Emergency-Backup and Off-Grid Functionality
- Highest Efficiency Thanks to a Real High-Voltage Series Connection
- The Patented Modular Plug Design Requires no Internal Wiring and Allows for Maximum Flexibility and Ease of Use
- Cobalt Free Lithium Iron Phosphate (LFP) Battery: Maximum Safety, Life Cycle, and Power
- Compatible with Leading 1 and 3 Phase High Voltage Battery Inverters
- Two Distinct Modules to Cover the Complete Range of System Sizes
- Highest Safety Standards like VDE 2510-50



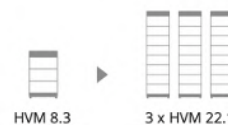
BATTERY-BOX PREMIUM HVS

One Battery-Box Premium HVS is composed of 2 to 5 HVS battery modules that are connected in series to achieve a usable capacity of 5.1 to 12.8 kWh. Additionally, direct parallel connection of up to 3 identical Battery-Box Premium HVS allows a maximum capacity of 38.4 kWh. Ability to scale by adding HVS modules or parallel HVS stacks later.



BATTERY-BOX PREMIUM HVM

One Battery-Box Premium HVM is composed of 3 to 8 HVM battery modules that are connected in series to achieve a usable capacity of 8.3 to 22.1 kWh. Additionally, direct parallel connection of up to 3 identical Battery-Box Premium HVM allows a maximum capacity of 66.2 kWh. Ability to scale by adding HVM modules or parallel HVM stacks later.



FLEXIBLE, EFFICIENT, SIMPLE



Internal Plug Connection
No Additional Wiring Required



5.1 - 66.2 kWh
Tailored Sizing for Each Application



Extend Anytime
Easily Adapts to New Requirements



High Power
Power for Every Application



TECHNICAL PARAMETERS PREMIUM HVS / HVM

				
	HVS 5.1	HVS 7.7	HVS 10.2	HVS 12.8
Battery Module	HVS (2.56 kWh, 102.4 V, 38 kg)			
Number of Modules	2	3	4	5
Usable Energy [1]	5.12 kWh	7.68 kWh	10.24 kWh	12.8 kWh
Max Output Current [2]	25 A	25 A	25 A	25 A
Peak Output Current [2]	50 A, 5 s	50 A, 5 s	50 A, 5 s	50 A, 5 s
Nominal Voltage	204 V	307 V	409 V	512 V
Operating Voltage	160–230 V	240–345 V	320–460 V	400–576 V
Dimensions (H/W/D)	712x585x298 mm	945x585x298 mm	1178x585x298 mm	1411x585x298 mm
Weight	91 kg	129 kg	167 kg	205 kg

						
	HVM 8.3	HVM 11.0	HVM 13.8	HVM 16.6	HVM 19.3	HVM 22.1
Battery Module	HVM (2.76 kWh, 51.2 V, 38 kg)					
Number of Modules	3	4	5	6	7	8
Usable Energy [1]	8.28 kWh	11.04 kWh	13.80 kWh	16.56 kWh	19.32 kWh	22.08 kWh
Max Output Current [2]	50 A	50 A	50 A	50 A	50 A	50 A
Peak Output Current [2]	75 A, 5 s	75 A, 5 s	75 A, 5 s	75 A, 5 s	75 A, 5 s	75 A, 5 s
Nominal Voltage	153 V	204 V	256 V	307 V	358 V	409 V
Operating Voltage	120–173 V	160–230 V	200–288 V	240–345 V	280–403 V	320–460 V
Dimensions (H/W/D)	945 x 585 x 298 mm	1178 x 585 x 298 mm	1411 x 585 x 298 mm	1644 x 585 x 298 mm	1877 x 585 x 298 mm	2110 x 585 x 298 mm
Weight	129 kg	167 kg	205 kg	243 kg	281 kg	319 kg
Short Circuit Current	2300A	2300A	2300A	2300A	2300A	2300A
Rated Power	7.65 kW	10.2 kW	12.8 kW	15.35 kW	17.9kW	20.45 kW

HVS & HVM

Operating Temperature	-10 °C to +50°C
Battery Cell Technology	Lithium Iron Phosphate (cobalt-free)
Communication	CAN/RS485
Enclosure Protection Rating	IP55
Round-trip Efficiency	≥96%
Certification	VDE2510-50 / IEC62619 / CEC / CE / UN38.3
Applications	ON Grid / ON Grid + Backup / OFF Grid
Warranty [3]	10 Years
Compatible Inverters	Refer to BYD Battery-Box Premium HVS / HVM Compatible Inverter List

[1] DC Usable Energy, Test conditions: 100% DOD, 0.2C charge & discharge at + 25 °C. System Usable Energy may vary with different inverter brands
[2] Charge derating will occur between -10 °C and +5 °C
[3] Conditions apply. Refer to BYD Battery-Box Premium Limited Warranty Letter.



BYD Company Limited
www.bydbatterybox.com
Global Sales: batteryboxgrp@byd.com
Global Service: bboxeservice@byd.com

Battery-Box EU Service Partner
EFT-Systems GmbH
www.eft-systems.de
service@eft-systems.de

Battery-Box AU Service Partner
Alps Power Pty Ltd
www.alppower.com.au
service@alppower.com.au

Battery-Box US Service Partner
EFT-Systems GmbH
www.eft-systems.de/us
USservice@eft-systems.de

V1.1

