

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Optimización económica en instalaciones eléctricas residenciales: el ahorro energético mediante IoT y energías renovables

Autor: Pablo Cueto Martín

Tutor: Francisco Javier Zarco Soto

José Luis Martínez Ramos

**Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2026



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Optimización económica en instalaciones eléctricas residenciales: el ahorro energético
mediante IoT y energías renovables**

Autor:

Pablo Cueto Martín

Tutor:

Francisco Javier Zarco Soto

Profesor sustituto interino

Tutor:

José Luis Martínez Ramos

Catedrático de universidad

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2026

Trabajo Fin de Grado: Optimización económica en instalaciones eléctricas residenciales: el ahorro energético mediante IoT y energías renovables

Autor: Pablo Cueto Martín

Tutor: Francisco Javier Zarco Soto
José Luis Martínez Ramos

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2026

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En este trabajo me gustaría agradecer a todas aquellas personas que han estado a mi lado especialmente en esta etapa de mi vida dentro de la escuela. Especialmente quiero agradecer a mi madre quien ha dedicado el esfuerzo para dar a sus hijos la posibilidad de tener una formación universitaria; a mi pareja, quien me ha acompañado durante toda mi etapa universitaria y ha sabido apoyarme en los momentos más difíciles; a mis hermanos y amigos quienes me han motivado a seguir; y también quisiera agradecer a aquellos profesores que han sabido transmitir sus enseñanzas en mi formación en la ingeniería.

Pablo Cueto Martín

Estudiante de Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Sevilla, 2025

Este estudio se ha centrado en la optimización económica en instalaciones eléctricas residenciales en España mediante el análisis de la viabilidad financiera de la energía solar fotovoltaica (FV) y la implementación estratégica de dispositivos del Internet de las Cosas (IoT), así como la combinación de estas. Ya que estas instalaciones se orientan a la gestión de la demanda. Para establecer la base del análisis, se realizó una recopilación exhaustiva de las cargas domésticas más representativas en el sector residencial español. Y una revisión de las tecnologías existentes para el autoconsumo residencial, evaluando alternativas y fundamentando la elección de la fotovoltaica como opción prioritaria. El estudio de la viabilidad de las tecnologías se realizó en tres perfiles diferentes de consumo, obteniendo así una visión más clara y realista de los resultados. Se concluye con una reflexión de las variables que influyen en los resultados y las recomendaciones a seguir para un consumidor interesado en la optimización económica de su demanda eléctrica.

Abstract

This study has focused on economic optimization in residential electrical installations in Spain through the analysis of the financial viability of photovoltaic solar energy (PV) and the strategic implementation of Internet of Things (IoT) devices, as well as the combination of these. This is because these installations are oriented towards demand management. To establish the basis for the analysis, an exhaustive compilation of the most representative domestic loads in the Spanish residential sector was carried out, along with a review of existing technologies for residential self-consumption, evaluating alternatives and justifying the choice of PV as the priority option. The viability study of the technologies was conducted across three different consumption profiles, thus obtaining a clearer and more realistic view of the results. The study concludes with a reflection on the variables that influence the results and the recommendations for a consumer interested in the economic optimization of their electricity demand.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
2 Marco Teórico	3
2.1. <i>Tipos de cargas</i>	3
2.1.1 Introducción	3
2.1.2 Calefacción	5
2.1.3 ACS	6
2.1.4 Cocina	6
2.1.5 Refrigeración	7
2.1.6 Iluminación	7
2.1.7 Electrodomésticos	7
2.1.8 Standby	8
2.1.9 Consumo según usos energéticos	8
2.2. <i>IoT</i>	9
2.2.1 Introducción	9
2.2.2 IoT	10
2.2.3 Implementación en hogares	10
2.2.4 Redes de sensores	11
2.2.5 Adquisición e implementación de dispositivos IoT	11
2.2.6 Conclusión	12
2.3. <i>Energías renovables en entornos domésticos</i>	12
2.3.1 Introducción	12
2.3.2 Situación actual en España	12
2.3.3 Autoconsumo	15
2.3.4 Tipos de energías renovables en entornos domésticos	17
2.4. <i>Beneficios de la combinación IoT y energías renovables</i>	25
2.4.1 Introducción	25
2.4.2 Monitoreo y Optimización del Rendimiento	25
2.4.3 Gestión Eficiente de la Red y la Demanda	26
2.4.4 Beneficios para el consumidor y el operador	26
2.4.5 Conclusión	26
3 Metodología	27
3.1 <i>Descripción del caso simulado</i>	27
3.2 <i>Selección de tecnologías y equipos</i>	28
3.2.1 Elección de la energía solar fotovoltaica como opción prioritaria en el autoconsumo	28

3.2.2	Selección de equipos para la instalación fotovoltaica	29
3.2.3	Selección de dispositivos IoT	36
3.3	<i>Descripción del de la metodología y formulas empleadas</i>	38
3.3.1	Estimación del gasto eléctrico	38
3.3.2	Estimación de los ahorros obtenidos	41
3.3.3	Cálculos empleados	44
4	Análisis de los casos simulados	47
4.1	<i>Estudio del consumo de viviendas sin implantación de generación renovable ni dispositivos IoT</i>	47
4.1.1	Coste de peaje de transporte y distribución	47
4.1.2	Coste del consumo eléctrico	48
4.1.3	Coste alquiler de equipos	51
4.1.4	Impuestos	51
4.1.5	Factura Total y gasto anual	52
4.2	<i>Estudio del ahorro de viviendas con implantación de generación renovable</i>	52
4.2.1	Dimensionamiento de la instalación fotovoltaica	52
4.2.2	Coste de la instalación fotovoltaica	55
4.2.3	Ahorros producidos por la instalación fotovoltaica.	55
4.2.4	Rentabilidad de la instalación fotovoltaica	57
4.3	<i>Estudio del ahorro de viviendas con implantación de dispositivos IoT</i>	60
4.3.1	Dimensionamiento de la instalación de dispositivos IoT	60
4.3.2	Coste de la instalación IoT	62
4.3.3	Ahorros producidos por la instalación IoT	63
4.3.4	Rentabilidad de la instalación IoT	64
4.4	<i>Estudio del ahorro de viviendas con la combinación de generación renovable y dispositivos IoT</i>	66
4.4.1	Coste conjunto de la instalación fotovoltaica y de dispositivos IoT	66
4.4.2	Ahorros producidos en conjunto por la instalación fotovoltaica y los dispositivos IoT	66
4.4.3	Rentabilidad resultada de ambas tecnologías	67
4.5	<i>Discusión de los resultados</i>	69
4.5.1	Instalación Fotovoltaica	69
4.5.2	Dispositivos IoT	70
4.5.3	Combinación de las dos tecnologías	71
5	Conclusiones	72
6	Referencias	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Facturación eléctrica para cada consumidor sin la implantación de tecnologías para el ahorro energético.	52
Tabla 2. Facturación eléctrica de cada usuario con la instalación de fotovoltaica	57
Tabla 3. VAN calculado a 20 años para la instalación fotovoltaica para un usuario de consumo bajo.	58
Tabla 4. VAN calculado a 20 años para la instalación fotovoltaica para un usuario de consumo medio.	59
Tabla 5. VAN calculado a 20 años para la instalación fotovoltaica para un usuario de consumo alto.	60
Tabla 6. Número de dispositivos de iluminación inteligente por usuario y tipo de dispositivo.	60
Tabla 7. Número de enchufe y regletas inteligentes para cada consumidor.	62
Tabla 8. Inversión inicial para cada consumidor en dispositivos IoT.	62
Tabla 9. Facturación para cada usuario con dispositivos IoT.	64
Tabla 10. VAN calculado a 20 años de dispositivos IoT para un usuario de consumo bajo.	65
Tabla 11. VAN calculado a 20 años de dispositivos IoT para un usuario de consumo medio.	65
Tabla 12. VAN calculado a 20 años de dispositivos IoT para un usuario de consumo alto.	66
Tabla 13. Inversión inicial de cada consumidor para las instalaciones.	66
Tabla 14. Facturación mensual de cada consumidor con instalación fotovoltaica y dispositivos IoT.	67
Tabla 15. VAN calculado a 20 años de con combinación de fotovoltaica y dispositivos IoT para un usuario de consumo bajo.	68
Tabla 16. VAN calculado a 20 años de con combinación de fotovoltaica y dispositivos IoT para un usuario de consumo medio.	68
Tabla 17. VAN calculado a 20 años de con combinación de fotovoltaica y dispositivos IoT para un usuario de consumo alto.	69
Tabla 18. Comparación del sobredimensionamiento de la instalación fotovoltaica respecto a la potencia pico contratada y el TIR calculado para cada instalación.	69
Tabla 19. Comparación entre el porcentaje gastado del total de los dispositivos IoT, y el TIR calculado para la instalación de estos dispositivos	70
Tabla 20. TIR para cada usuario según el tipo de instalación.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tendencia en los últimos 30 años. Fuente: Elaboración propia basado en (1) y (2)	4
Figura 2. Distribución de las Zonas Climáticas en España. Fuente: (1)	4
Figura 3. Consumo de Energía Final en 2023 (Calefacción). Fuente: [2]	6
Figura 4. Consumo de Energía Final en 2023 (Calefacción). Fuente: [2]	6
Figura 5. Consumo de Energía Final en 2023 (Cocina). Fuente: [2]	7
Figura 6. Consumo por usos (Electrodomésticos). Fuente: [2]	7
Figura 7. Estructura del consumo por usos. Fuente: [2]	8
Figura 8. Desglose del consumo eléctrico por usos. Fuente: (2)	9
Figura 9. Evolución de Consumo de Energía Bruta. Fuente: [8]	13
Figura 10. Evolución de Consumo de Energía Bruta (Renovables). Fuente: [8]	13
Figura 11. Evolución de la Potencia Eléctrica Instalada Acumulada. Fuente: [9]	14
Figura 12. Evolución Potencia Eléctrica Instalada. Fuente: [8]	14
Figura 13. Evolución de la Generación Eléctrica Renovable y No Renovable. Fuente: [10]	15
Figura 14. Ejemplos de sistemas prefabricados, termosifón y forzados. Fuente: [22]	17
Figura 15: Evolución potencia fotovoltaica de autoconsumo instalada. Fuente: [24]	19
Figura 16. Instalación Fotovoltaica con Almacenamiento, Cargador de VE y Vertido a Red. Fuente: [26]	20
Figura 17. Mapa Eólico de la Península Ibérica y las Islas Canarias. Fuente: [31]	22
Figura 18. Consumo de Energía (tep) por Fuentes (Biomasa y Biogás). Fuente: [34]	23
Figura 19. Ejemplos de Implementación de Biomasa en Hogares. Estufa de Leña y Chimenea. Fuente: [36]	24
Figura 20. Esquema de instalación de biomasa en el sector residencial. Fuente: [36]	24
Figura 21. Punto de Máxima Potencia Gráficamente. Fuente: [44]	29
Figura 22. Explicación del término Air Mass. Fuente: [44]	30
Foto 23. Buried Contact Cell. Fuente: [44]	31
Figura 24. Point-Contact Cell. Fuente: [44]	32
Figura 25. PERL Cell junto con la curva característica I/V. Fuente: [44]	32
Figura 26. Conexión típica de un inversor a la red pública Fuente: [44]	33
Figura 27. Región operativa de un inversor usando el inversor SMC8000TL como ejemplo Fuente: [44]	35
Figura 28. Peajes de Transporte y Distribución. Fuente: [63]	39
Figura 29. Tramos horarios del término de la energía para el peaje 2.0 TD. Fuente: [64]	39
Figura 30. Curva de consumo residencial promedio. Fuente: [67]	40
Figura 31. Curva promedio de generación fotovoltaica. Fuente: [67]	42
Figura 32. Diferencia entre consumo y generación FV. Fuente: Elaboración propia basado en: [67].	42
Figura 33. Comparativa entre curva de consumo antes y después de instalación FV. Fuente: Elaboración propia	

basado en: [67].

43

Figura 34. Curva de consumo promedio del peaje 2.0TD con discriminación horaria. **Fuente:** Elaboración propia basado en [67] y [64]. 48

Figura 35. Curva de consumo con potencia pico 3,5 kW. **Fuente:** Elaboración propia basado en [67]. 49

Figura 36. Curva de consumo con potencia pico 5 kW. **Fuente:** Elaboración propia basado en [67]. 50

Figura 37. Curva de consumo con potencia pico 7,5 kW. **Fuente:** Elaboración propia basado en [67]. 51

1 INTRODUCCIÓN

El sector residencial en España representa una porción significativa del consumo de energía final, alcanzando aproximadamente el 17%, y constituye una cuarta parte de la demanda eléctrica total. Aunque históricamente la tendencia de la demanda energética ha sido creciente debido al aumento de hogares y la mejora en la calidad de vida que conlleva un mayor equipamiento, las políticas de planificación y los avances tecnológicos han logrado revertir esta dirección durante la última década. No obstante, la dependencia de fuentes externas de energía sigue siendo un desafío crucial, haciendo imperativa la búsqueda de soluciones para la optimización económica y la eficiencia energética en el ámbito doméstico.

Este estudio aborda la optimización económica en instalaciones eléctricas residenciales mediante la implementación estratégica de dos pilares tecnológicos fundamentales: la energía solar fotovoltaica (FV) y los dispositivos del Internet de las Cosas (IoT). La finalidad primordial es analizar la viabilidad económica de estas tecnologías, tanto de manera individual como en combinación, para determinar su potencial de ahorro y rentabilidad en el contexto de las viviendas en España.

Para llevar a cabo la evaluación, se ha establecido un marco de análisis riguroso, centrado en un caso simulado de una vivienda unifamiliar representativa en España. Se ha optado por modelar tres perfiles de consumo distintos, definidos por potencias contratadas de que permiten examinar la efectividad de las estrategias de gestión avanzada en diferentes niveles de demanda.

La elección tecnológica se sustenta en la hegemonía y rentabilidad demostrada de la energía solar fotovoltaica para el autoconsumo eléctrico. Complementariamente, se evalúa el potencial de los dispositivos IoT (enfocados en la gestión de iluminación, climatización o HVAC y reducción del standby), que permiten un control proactivo y automatizado del consumo. La implementación de IoT en entornos residenciales busca maximizar la eficiencia y reducir el desperdicio energético. De hecho, la combinación sinérgica de la FV y el IoT podría ser una solución clave para monitorear, optimizar y gestionar de forma inteligente los sistemas energéticos domésticos, especialmente para contrarrestar la naturaleza intermitente de la producción solar.

La metodología empleada en este estudio se basa en un análisis económico detallado que utiliza las herramientas de evaluación financiera más reconocidas: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Rendimiento (TIR). Estos criterios permiten determinar la rentabilidad de la inversión.

En las siguientes secciones se desarrollan el marco teórico sobre las cargas residenciales, la tecnología IoT y las energías renovables, para posteriormente describir la metodología de cálculo y el análisis detallado de los tres casos simulados, culminando con la discusión de los resultados y las conclusiones sobre la optimización económica en la transición energética residencial.

2 MARCO TEÓRICO

SE aborda el marco teórico necesario para establecer una comprensión sólida del contexto de consumo eléctrico residencial y las soluciones tecnológicas disponibles. Se comienza con una clasificación detallada de los tipos de cargas domésticas. A continuación, se introduce el Internet de las Cosas (IoT), explicando su funcionamiento y su implementación en hogares inteligentes. Posteriormente, se examina el panorama de las energías renovables en entornos domésticos, revisando la situación actual en España y las diversas tecnologías de autoconsumo disponibles, como la solar térmica, la fotovoltaica, la minieólica y la biomasa. Todo ello culmina con el análisis de los beneficios de la combinación sinérgica de IoT y energías renovables, especialmente la energía fotovoltaica, para optimizar el rendimiento y gestionar eficientemente la red y la demanda eléctrica. Esta base conceptual resultará esencial antes de proceder al diseño metodológico y el análisis práctico de los casos simulados desarrollados en capítulos subsiguientes.

2.1. Tipos de cargas

2.1.1 Introducción

En España el sector residencial supone un 17% del consumo de energía final y un cuarto de la demanda eléctrica [1]. Esto es debido al incremento de hogares, así como el aumento de la calidad de vida, lo que da por consecuencia un aumento del equipamiento. Esto nos hacía prever una tendencia creciente en cuanto a la demanda energética, sin embargo, políticas de planificación y los avances tecnológicos, han logrado revertir esta tendencia desde hace más de una década.

Consumo Energético (ktep) del Sector Residencial en España

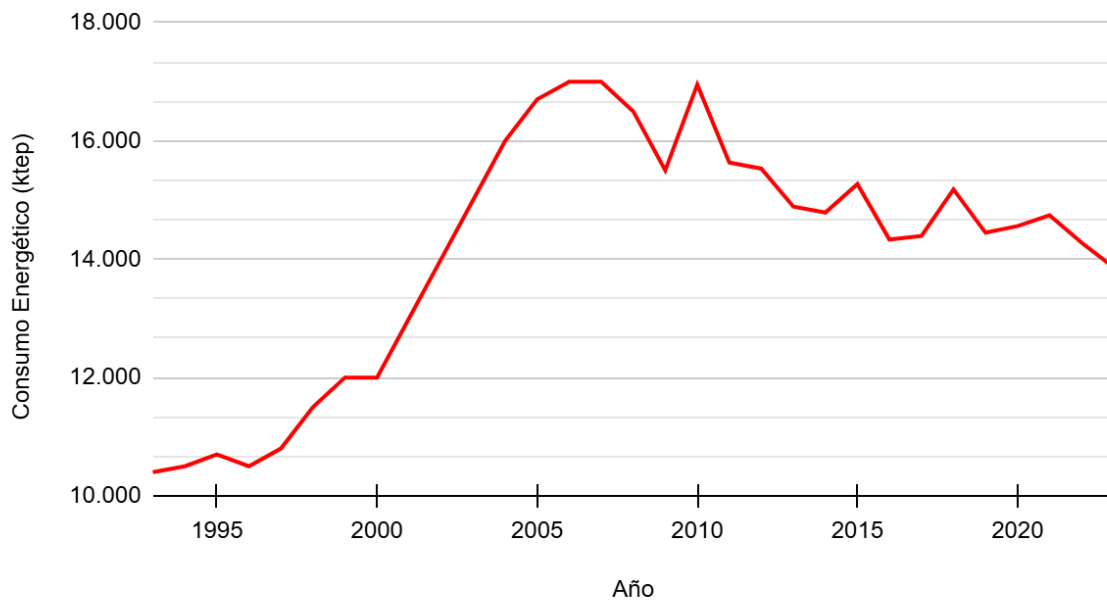


Figura 1. Tendencia en los últimos 30 años. **Fuente:** Elaboración propia basado en (1) y (2)

Con el fin de establecer estas medidas se estudiarán las diferentes variables que influyen en el consumo de una vivienda, tales como consumos energéticos globales, segmentados por uso; tipos de alojamientos, zonas climáticas, aplicaciones, usos, etc.

Para el análisis se han considerado tres zonas climáticas en España, mediterránea, continental y atlántico-norte, ya que presentan variaciones significativas en las temperaturas.



Figura 2. Distribución de las Zonas Climáticas en España. **Fuente:** (1)

Respecto al tipo de vivienda se ha segmentado en viviendas unifamiliares o viviendas en bloque debido a la diferencia de consumo entre ambas.

Para el análisis de la demanda energética de la vivienda, se han tenido en cuenta los principales equipamientos eléctricos presentes en un hogar tipo, clasificados según su uso:

- **Servicio eléctrico de calefacción:**
 - Bomba de calor reversible
 - Bomba de calor no reversible
 - Calefactor eléctrico
 - Convector eléctrico
 - Radiador eléctrico
 - Caldera eléctrica
- **Agua caliente sanitaria (ACS):**
 - Calentador eléctrico de agua
- **Refrigeración:**
 - Aire acondicionado
 - Bomba de calor reversible
- **Cocina:**
 - Cocina eléctrica
 - Cocina vitrocerámica
 - Cocina de inducción
- **Electrodomésticos:**
 - Frigorífico
 - Congelador
 - Lavadora
 - Lavavajillas
 - Secadora
 - Horno
 - Microondas
 - Televisor
 - Ordenador (de sobremesa y/o portátil)
 - Otros equipamientos eléctricos

También se han estimado, debido a la enorme dificultad que supondría su medición, los consumos de ciertos servicios o usos en base a equipamientos no medidos, como podrían ser consumos de iluminación, standby y otros equipamientos.

El equipamiento antes mencionado, ha sido seleccionado en base a la tasa de equipamiento, en la mayoría de los hogares españoles se dispone de agua caliente sanitaria, cocina y electrodomésticos. Aunque se dan ciertas diferencias entre las zonas climáticas, estas diferencias son debidas al clima, por lo que se harán más notables en sistemas de calefacción y refrigeración. [1]

En cuanto al tipo de vivienda el equipamiento se mantiene en torno a la media nacional, salvo en congeladores, lavavajillas y secadoras, más presentes en viviendas unifamiliares.

2.1.2 Calefacción

En las viviendas unifamiliares españolas de zonas climáticas como la Continental y Mediterránea, la calefacción es un servicio muy común y representa cerca del 40% del consumo energético del hogar [2], convirtiéndose en el uso con mayor demanda. Este servicio se caracteriza por un promedio de 1,3 sistemas por vivienda, con una clara predominancia de los sistemas de calefacción individual que alcanzan el 82%. Por otro lado, la calefacción

central solo está presente en el 8% de los hogares en general, aunque su uso es notablemente mayor en la zona Continental, donde llega al 18%. Es relevante que el 70% de estos hogares cuenta con termostato o sistemas de regulación de temperatura, un punto clave para la optimización.

La caldera convencional está presente en casi la mitad de los hogares españoles, especialmente en la zona Continental y viviendas en bloque. En contraste, en la zona Mediterránea se prefieren los equipos eléctricos como bombas de calor reversibles y radiadores. La adopción de sistemas más eficientes, como las calderas de condensación, es insignificante, representando solo el 1% de los hogares con calefacción.

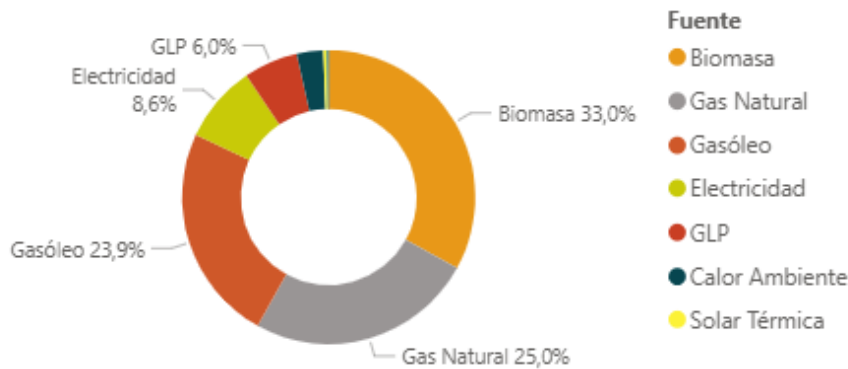


Figura 3. Consumo de Energía Final en 2023 (Calefacción). Fuente: [2]

Las fuentes energéticas más utilizadas para calefacción son la biomasa, concentrando un tercio del total, seguido de gas natural y gasóleo con en torno a un cuarto cada una [2].

2.1.3 ACS

El agua caliente sanitaria es un servicio que aparece prácticamente en la totalidad de hogares, con predominio de equipos individuales frente colectivos.

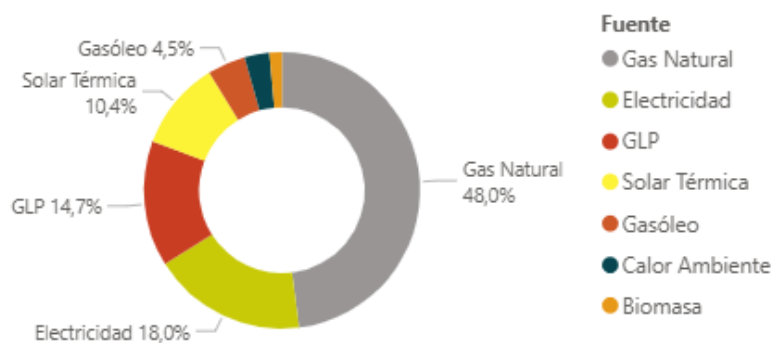


Figura 4. Consumo de Energía Final en 2023 (Calefacción). Fuente:[2]

Las fuentes de energía más usadas son gas natural, seguido de la electricidad, variando según zona climática y tipo de vivienda [2].

2.1.4 Cocina

Al igual que el agua caliente sanitaria, la cocina es un equipamiento con el que cuentan prácticamente todos los hogares españoles. En estos últimos años ha habido un incremento de las cocinas eléctricas como vitrocerámicas e inducción, dejando de lado las cocinas de gas más comunes en la década pasada [2].

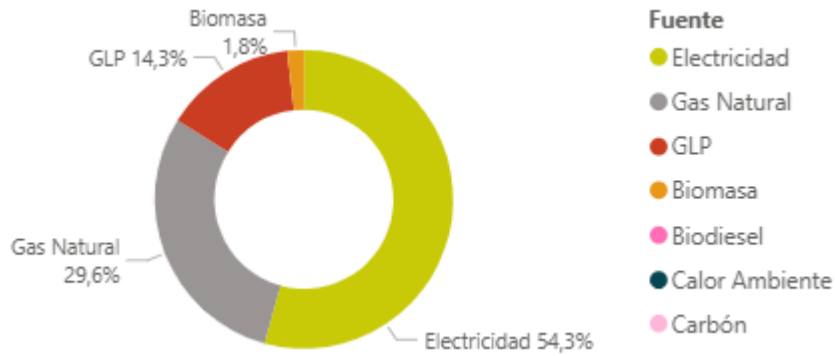


Figura 5. Consumo de Energía Final en 2023 (Cocina). Fuente:[2]

La fuente energética mayoritaria en las cocinas es la electricidad, seguida por el gas natural o GLP.

2.1.5 Refrigeración

Alrededor de la mitad de las viviendas en España, están equipadas con algún sistema de refrigeración. Las diferencias en este caso sí están muy marcadas por el clima, siendo un equipamiento, en el caso del clima mediterráneo del 67%, por el contrario, en la zona atlántica el número de viviendas con este equipamiento es residual, con un 1% de los hogares [1]. El equipo más instalado es la bomba de calor reversible con una media nacional de cerca del 80%.

Como fuente energética, estos equipos usan electricidad, disponiendo el 62% de hogares de algún tipo de sistema de regulación de temperatura.

2.1.6 Iluminación

Los hogares españoles presentan una media de 23 bombillas, esto es equivalente a 3 por estancia. Este número se incrementa en viviendas unifamiliares [1].

En cuanto a la fuente energética, la electricidad está presente en la totalidad de la iluminación en España.

2.1.7 Electrodomésticos

En todos los hogares españoles, podemos encontrarnos con algún tipo de electrodoméstico, ya sea de gama blanca o marrón.

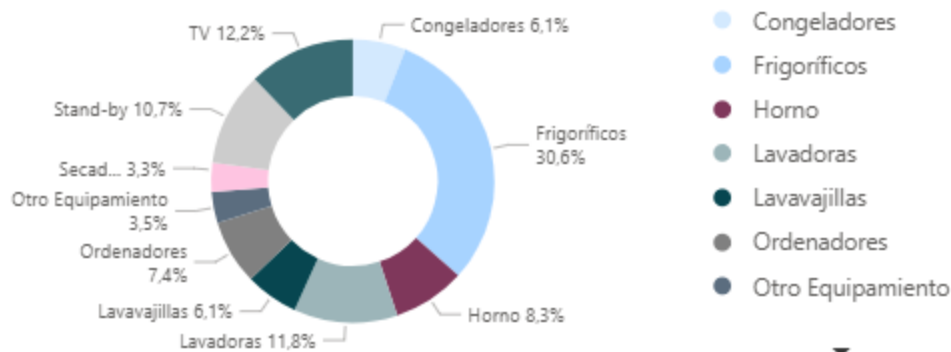


Figura 6. Consumo por usos (Electrodomésticos). Fuente: [2]

Los electrodomésticos de gama blanca son aquellos de gran tamaño relacionados con tareas del hogar. Aquí se

encuentran frigorífico, lavadora, secadora, horno, lavavajillas y congelador. El equipo con más penetración es el frigorífico, seguido de lavadora, horno y lavavajillas. Entre los de menor penetración encontraríamos secadora, o arcón. De media cada hogar cuenta con unos 4 equipos de gama blanca.

La penetración de electrodomésticos de alta eficiencia de estos equipos, según su etiqueta, difiere según el equipo. Considerando las clases A, A+ y A++, frigoríficos, lavadoras y lavavajillas son los más eficientes.

Los electrodomésticos de gama marrón se refieren a aparatos electrónicos de consumo, principalmente usados para entretenimiento, imagen y sonido, dentro de esta categoría se englobarían aparatos como, televisor, microondas, DVD, ordenadores, módem ADSL, equipos de música, consolas, VHS y alarma. Siendo la televisión el dispositivo con mayor penetración con presencia casi en la totalidad de hogares, siguiéndole microondas y DVDs, también con muy alta penetración, entre 90% y 80%. En cuanto ordenadores, su uso tiene una tendencia creciente con una penetración del 70%.

En cuanto al total en número, el número de dispositivos de gama marrón por vivienda se encuentra en 7 de media.

Cabe mencionar además de estas dos gamas de las que se han hablado antes, existe una tercera gama, llamada “gama gris” que incluye aparatos de informática y telecomunicaciones como smartphones, tablets, impresoras y ordenadores. Estos últimos han sido englobados también en la gama marrón ya que se ha profundizado en más detalle debido a que su consumo es mayor.

Mencionar también los PAE, pequeños aparatos electrodomésticos, que abarcan gran variedad de dispositivos de cuidado personal, cocina y hogar, tales como, cafeteras, tostadoras, planchas, etc.

2.1.8 Standby

El Standby, es una opción propia de electrodomésticos de gama marrón, aunque fuera de esa categoría, existen equipos como las lavadoras que pueden presentar esta opción, por lo tanto podemos encontrarlo en la mayoría de hogares. Casi el 80% de televisiones, dispone de standby, lo que asociado al número de televisiones, implica un consumo notorio. De media, hay 1,6 televisores con standby por vivienda.

2.1.9 Consumo según usos energéticos

El mayor porcentaje del consumo total se concentra en la calefacción, que representa casi la mitad de la energía utilizada en el hogar. El Agua Caliente Sanitaria (ACS) y los electrodomésticos también constituyen usos energéticos significativos, ambos con alrededor de una quinta parte del total, seguidos por la cocina, la iluminación y, en menor medida, el aire acondicionado y otros equipos. Esta distribución inicial destaca que cualquier estrategia de optimización económica y eficiencia energética debe enfocarse prioritariamente en los sistemas de calefacción, dada su importancia en la demanda total de electricidad [2].

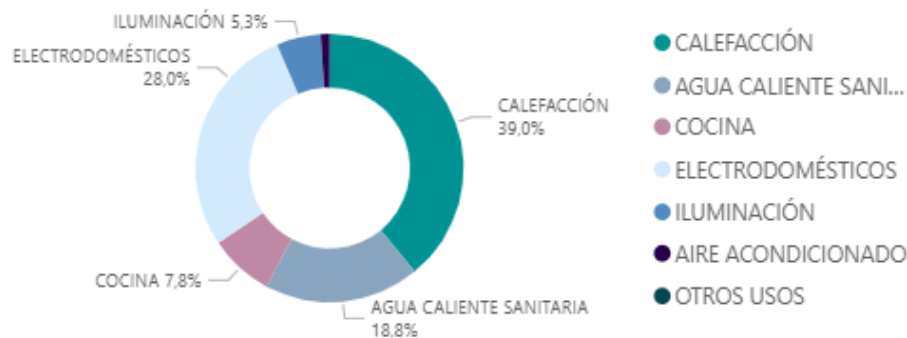


Figura 7. Estructura del consumo por usos. Fuente:[2]

Al examinar en detalle el consumo atribuido a los electrodomésticos, se observa que ciertos aparatos tienen un

impacto considerable en la factura eléctrica. Los frigoríficos y congeladores representan una parte importante del consumo dentro de este sector, sumando entre ambos, más de un tercio del total de electrodomésticos. Por otra parte, los equipos de lavado, como lavadoras y lavavajillas, representan casi un 12% y un 6%, respectivamente. Otros dispositivos electrónicos y de ocio, como televisores y ordenadores, también contribuyen notablemente al consumo, junto con el uso de hornos. Es relevante mencionar que el consumo en modo "Stand-by" también constituye una porción significativa del uso energético de los electrodomésticos, con algo más del 10%. Comprender esta desagregación es esencial para identificar los puntos críticos de consumo y desarrollar medidas de optimización dirigidas a los aparatos de mayor demanda [1].

También es interesante ver el impacto de cada dispositivo en el consumo eléctrico, que a diferencia de lo explicado en el párrafo anterior se centra en el consumo total. La mayor parte del consumo eléctrico corresponde a Electrodomésticos con un 61,79% del total. Le siguen Iluminación con 11,75%, Cocina con 9,28%, Agua Caliente Sanitaria con 7,47%, Calefacción con 7,36%, y Aire Acondicionado con 2,34%

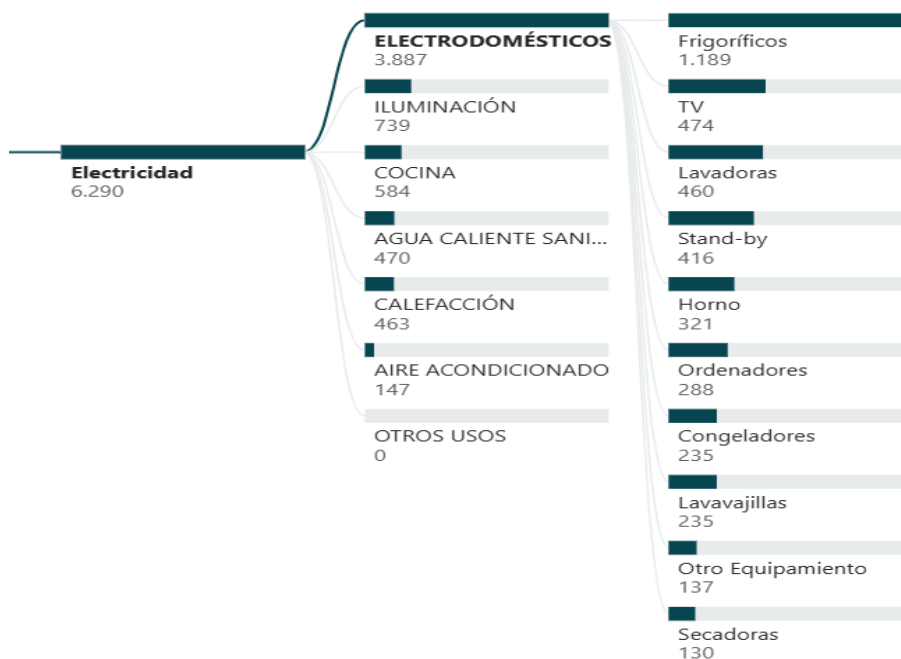


Figura 8. Desglose del consumo eléctrico por usos. **Fuente:** (2)

2.2. IoT

2.2.1 Introducción

La aparición en hogares de dispositivos inteligentes ha cambiado radicalmente la vida cotidiana, esto ha colocado al internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) en un pilar fundamental en la búsqueda de hogares más eficientes y cómodos. Estos sistemas permiten una comunicación y el intercambio de datos a través de redes cableadas o inalámbricas, abarcando desde smartphones hasta electrodomésticos y equipos de oficina con sensores integrados. Si bien la implementación de estas tecnologías en hogares mejora la comodidad y seguridad, es crucial abordar los costos energéticos adicionales que generan. Por tanto, una gestión energética efectiva se vuelve indispensable a la hora de optimizar el consumo de este entorno. [3]

El concepto de hogar inteligente ha evolucionado significativamente hasta convertirse en una solución integral que facilita y eleva la calidad de vida de las personas. Un hogar inteligente se define por la interconexión de equipos que pueden ser controlados a distancia, ofreciendo características esenciales como disponibilidad en línea, fácil acceso, comodidad de uso, conectividad abierta y capacidad de interconexión con otros equipos. La convergencia de estas tecnologías con la integración de dispositivos IoT en viviendas abren un momento revolucionario en una vida energéticamente eficiente, permitiendo automatización y control remoto de diversas

funciones.

Estos sistemas necesitan de un núcleo, lo que sería el centro coordinador, que conecta los diferentes dispositivos IoT mediante protocolos inalámbricos como WiFi y Bluetooth. Los sensores integrados en estos aparatos recopilan datos, los cuales son transmitidos a una central para procesamiento y análisis. Esta infraestructura permite a los usuarios interactuar con sus dispositivos, de esta forma mediante apps o páginas webs, se facilita el monitoreo en tiempo real, la programación inteligente y el control remoto de electrodomésticos. Es en esta capacidad de optimización y gestión inteligente, impulsada por los datos, donde reside el verdadero potencial para lograr un ahorro significativo en hogares modernos.

2.2.2 IoT

En el ámbito de hogares inteligentes, el internet de las cosas se traduce en una automatización y conectividad avanzadas. Esto posibilita que los dispositivos interactúen, compartan datos y ejecuten sus tareas de una manera eficiente, haciendo que se optimice la comodidad y control para los usuarios. La implementación de un sistema domótico inteligente basado en IoT ofrece mayor dominio sobre la residencia, promoviendo la automatización, ahorro energético y mejor accesibilidad. Los portales inteligentes facilitan la comunicación y la gestión de los electrodomésticos conectados para potenciar la automatización y la eficiencia. Complementariamente, la incorporación de fuentes de energías renovables en el entorno doméstico representa otra vía fundamental para maximizar los beneficios. [4]

2.2.3 Implementación en hogares

La implementación de IoT en hogares inteligentes se sustenta en un entramado de tecnologías. En este contexto, diversos sensores y dispositivos se instalan en viviendas para monitorear múltiples factores físicos. Los datos recopilados por estos elementos son fundamentales para la toma de decisiones, adaptándose a las necesidades específicas de cada aplicación. Así, la fusión de componentes de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) de vanguardia, como sensores avanzados, infraestructuras de medición optimizadas y electrodomésticos inteligentes, culmina en el desarrollo de sofisticados sistemas de gestión energética doméstica. [3]

La tecnología del hogar inteligente abarca desde sistemas de climatización e iluminación hasta equipos de entretenimiento, con características clave centradas en comodidad, seguridad y, fundamentalmente, la eficiencia energética. La integración del IoT en estos espacios ha revolucionado la interacción con nuestros entornos vitales. Estos sistemas utilizan sensores, actuadores y componentes interconectados para crear un ambiente adaptado a las necesidades de los ocupantes. Por ejemplo, detectores de humo, alarmas y sistemas de seguridad que mejoran la protección, mientras que contadores inteligentes permiten una monitorización precisa del consumo energético. Además, las soluciones incluyen sistemas de monitoreo médico destinadas a controlar la salud de los residentes, control automatizado de la iluminación que ajusta la intensidad según el entorno y la hora del día, persianas inteligentes que se ajustan automáticamente aprovechando la luz y calor naturales y sistemas de climatización, como termostatos inteligentes, que mantienen una temperatura óptima de forma autónoma. También el empleo de sensores de presencia serviría para activar o desactivar entornos de iluminación o climatización según se encuentren personas o no en esos espacios. Otra aplicación sería el empleo de enchufes inteligentes que permiten controlar el consumo de electrodomésticos programando tareas según la franja tarifaria.

Con la creciente adopción de dispositivos IoT y la disponibilidad de productos más asequibles, la demanda de aplicaciones para hogares inteligentes ha experimentado un auge. Sin embargo, esta conveniencia conlleva costos energéticos adicionales, derivados de la electricidad necesaria para la automatización y conectividad a internet. Estos gastos varían significativamente según el diseño y el uso particular de cada vivienda, lo que resalta el principal desafío: la gestión energética. Es por ello, que resulta crucial abordar la automatización del hogar inteligente basado en IoT con una estrategia de optimización de consumo eléctrico.

Adicionalmente, la posibilidad de alimentar dispositivos IoT con fuentes de energía renovable, por ejemplo, paneles solares, reduce la dependencia de la red eléctrica convencional [5]. Junto con una infraestructura de red inteligente, permite optimizar el consumo energético aprovechando tarifas eléctricas con discriminación horaria,

por ejemplo en horas valle, lo que acaba resultando en un ahorro significativo en la factura. Esta convergencia tecnológica no solo mejora comodidad y seguridad, sino que también permite a los usuarios realizar una gestión energética proactiva y sostenible en sus hogares. Para hacer posible esta gestión por parte de los usuarios un sistema de acceso remoto, como por ejemplo apps en el caso de smartphones o webs desde ordenadores, permiten acceder y operar estos equipos desde cualquier parte, teniendo control continuo de nuestro hogar. Adicionalmente, implementar sistemas de autenticación como doble verificación o encriptación hacen la utilización de estos sistemas algo seguro, protegiendo información confidencial.

2.2.4 Redes de sensores

Para lograr una buena optimización energética de la vivienda, estos IoTs necesitan de sensores que proporcionen los datos imprescindibles que les indiquen cómo operar. Esta recopilación de datos se realiza mediante distintos métodos que siguen los sensores, ofreciendo información al momento de los patrones de consumo energético, monitoreando factores ambientales como pudieran ser la temperatura u otros datos que pudiesen afectar al consumo. Posteriormente compartiendo estos datos a el ecosistema de IoT, además este sistema es un proceso de mejora continua en el que mediante los datos recopilados, estos sensores se realimentan creando estrategias de mejora continua. [4]

Entre las consideraciones para estimar y reducir el consumo, es esencial monitorear el consumo. Esto varía según el número de equipos instalados, potencia nominal, rutinas de uso y si se emplean o no medidas de eficiencia energética. Para estimar correctamente la energía consumida por cada dispositivo, es importante hacer mediciones con multímetros para determinar las medidas de corriente y voltaje en los equipos en los que deseamos reducir el consumo.

En cuanto a los sistemas de calefacción y refrigeración, estos sistemas se encenderían exclusivamente en caso de que una persona esté en la habitación a la que dan servicio. Al salir los usuarios de la sala se apagarían y permanecerían apagados hasta que el sensor detectase alguna presencia. Como medida de ahorro, que ya ha sido comentada, es importante seleccionar electrodomésticos que sean eficientes y que presenten sistemas de ahorro de energía, tales como modo de hibernación, o apagado cuando no sean requeridos.

Para que estos sistemas puedan realizar estas funciones, se necesitan de equipos auxiliares de detección, procesamiento y comunicación. Estos equipos presentan consumos pasivos, pero prácticamente resultan insignificantes.

2.2.5 Adquisición e implementación de dispositivos IoT

Para la implementación de dispositivos de IoT enfocados en la gestión energética, existe una amplia oferta en el mercado, con empresas especializadas como Shelly y TP-Link. Estas marcas se centran en desarrollar soluciones de domótica que permiten la automatización del hogar y la optimización del consumo de energía.

Estos productos se caracterizan por ser accesibles, compactos y, en muchos casos, diseñados para una fácil integración. Gran parte de los dispositivos IoT actuales se conectan directamente a la red Wi-Fi del usuario, simplificando la instalación al no requerir un concentrador (hub) central para funcionar.

La gama de dispositivos incluye elementos esenciales para el control y la monitorización:

- **Dispositivos de medición y control integrado:** Se utilizan para monitorizar el consumo eléctrico en tiempo real y controlar el flujo de energía a circuitos o electrodomésticos específicos. Estos pueden tomar la forma de relés inteligentes o módulos compactos.
- **Termostatos inteligentes:** Permiten la gestión eficiente de los sistemas de climatización (calefacción/aire acondicionado), ajustando automáticamente la temperatura en función de horarios programados o la presencia del usuario, lo que contribuye directamente al ahorro energético.
- **Enchufes y bombillas inteligentes (Plug & Play):** Soluciones sencillas que permiten a los usuarios ejercer control sobre aparatos conectados a la red. Los enchufes inteligentes posibilitan programar el apagado de electrodomésticos, mientras que las bombillas inteligentes ofrecen la capacidad de ajustar la intensidad y establecer rutinas de iluminación para evitar el desperdicio.

Esta diversidad de soluciones permite construir sistemas personalizados, desde la simple automatización de tareas hasta complejas estrategias de optimización del autoconsumo y la maximización del ahorro energético.

2.2.6 Conclusión

La evolución de los hogares inteligentes, impulsada por la presencia del Internet de las Cosas (IoT), ha redefinido nuestra interacción con el entorno doméstico. Desde la capacidad de monitorear y controlar electrodomésticos remotamente hasta la optimización de la climatización y la iluminación mediante sensores y automatización, estas innovaciones buscan no solo mejorar la comodidad y la seguridad, sino, de manera crucial, la eficiencia energética.

La profunda integración del IoT en los entornos residenciales revela un potencial significativo para una optimización energética inteligente. La relación simbiótica entre estas aplicaciones tecnológicas y los hogares se erige como un pilar fundamental en la consecución de un futuro sostenible y ecológico. Al permitir una adaptación dinámica a las necesidades de los ocupantes y las condiciones ambientales, los sistemas inteligentes no solo minimizan el desperdicio de energía, sino que también abren la puerta a estrategias innovadoras como el aprovechamiento de tarifas eléctricas en horas valle y la integración de fuentes de energía renovable, como los paneles solares. En última instancia, el hogar inteligente trasciende la mera automatización para convertirse en un agente activo en la construcción de un consumo energético más consciente y responsable, empoderando a los usuarios para ser partícipes clave en la transición hacia un modelo de vida más verde y eficiente.

2.3. Energías renovables en entornos domésticos

2.3.1 Introducción

Las energías renovables son aquellas que provienen de fuentes naturales que se regeneran a un ritmo superior al de su consumo, como la energía solar y la eólica. A diferencia de los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas), cuya formación requiere de millones de años, estas fuentes son abundantes, casi inagotables y se encuentran disponibles a nivel global. [6]

La principal diferencia con los combustibles fósiles radica en su impacto ambiental. Mientras que la quema de combustibles fósiles libera gases de efecto invernadero perjudiciales, la generación de energías renovables produce una cantidad significativamente menor de emisiones. Por ello, la transición hacia estas fuentes energéticas es crucial para mitigar la crisis climática.

Además de su beneficio ecológico, las energías renovables ofrecen importantes ventajas a nivel socioeconómico:

- **Viabilidad económica:** Actualmente, en la mayoría de los países, las energías renovables son más competitivas en costos que los combustibles fósiles.
- **Creación de empleo:** Generan una cantidad considerablemente mayor de puestos de trabajo que el sector de los combustibles fósiles. [7]
- **Seguridad energética:** Al ser fuentes autóctonas, reducen la dependencia de suministros energéticos externos, lo que fortalece la seguridad y diversificación del abastecimiento energético de un país.
- **Innovación:** Impulsan el desarrollo de nuevas tecnologías.

En resumen, las energías renovables se presentan como la solución esencial para lograr un futuro sostenible, combinando beneficios medioambientales con un impulso al crecimiento económico y a la independencia energética.

2.3.2 Situación actual en España

En pleno auge de la transición energética, España ha observado un viraje del consumo de energías fósiles hacia fuentes renovables, impulsado por un crecimiento récord en la capacidad de generación y una estrategia gubernamental definida.

2.3.2.1 Energía Primaria

La energía primaria, es la base del sistema energético de un país, ya que mide la energía extraída directamente de fuentes naturales o la importada antes de cualquier proceso de transformación. Históricamente, el consumo total de energía bruta en España creció significativamente hasta alcanzar su pico en los años 2007-2008, para luego estabilizarse en niveles inferiores, lo que evidencia un cambio estructural. [8]

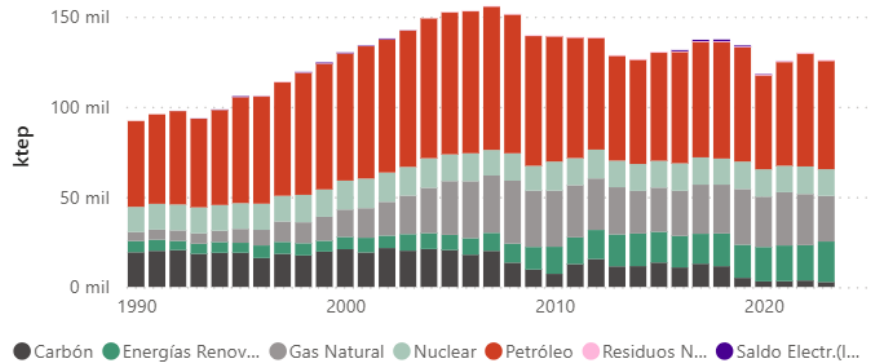


Figura 9. Evolución de Consumo de Energía Bruta. Fuente: [8]

A lo largo de este periodo, el petróleo ha sido la fuente dominante, seguido por el gas natural y la energía nuclear. No obstante, el análisis de la evolución muestra un incremento sostenido de las energías renovables, que han comenzado a desempeñar un papel cada vez más relevante.

Dentro del consumo primario de renovables, la eólica ha emergido como la principal fuente a partir de la década de 2010, superando a la hidráulica. En años recientes, la energía solar ha mostrado un crecimiento pronunciado, evidenciando una mayor diversificación. Aunque la biomasa y los biocombustibles mantienen una presencia constante.

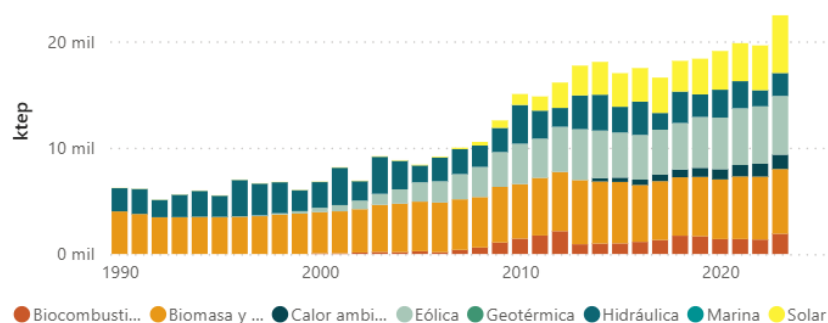


Figura 10. Evolución de Consumo de Energía Bruta (Renovables). Fuente: [8]

2.3.2.2 Consumo Energía Final

Los datos indican que, aunque el consumo de energía total ha sido dominado por los combustibles fósiles, se observa una clara tendencia hacia una mayor participación de la electricidad y, especialmente, de las energías renovables.

Dentro del mix renovable consumido, la biomasa y los biocombustibles han sido los componentes principales. Sin embargo, en la actualidad se aprecia una creciente diversificación con la expansión de otras fuentes como el biogás, la solar térmica y el calor ambiental, lo que demuestra una maduración y expansión de las tecnologías renovables en el consumo final [8].

2.3.2.3 Instalación y generación eléctrica

El sistema eléctrico español ha experimentado un crecimiento notable en su capacidad instalada, alcanzando un récord histórico de 132.343 MW a finales de 2024. Este aumento del 4,6% respecto al año anterior ha sido impulsado principalmente por la integración de nuevas fuentes renovables, que han crecido consistentemente en

los últimos años. En 2024, la potencia renovable instalada aumentó en 7,3 GW adicionales, su mayor incremento hasta la fecha, elevando la capacidad total de estas fuentes a 85,1 GW. [9]

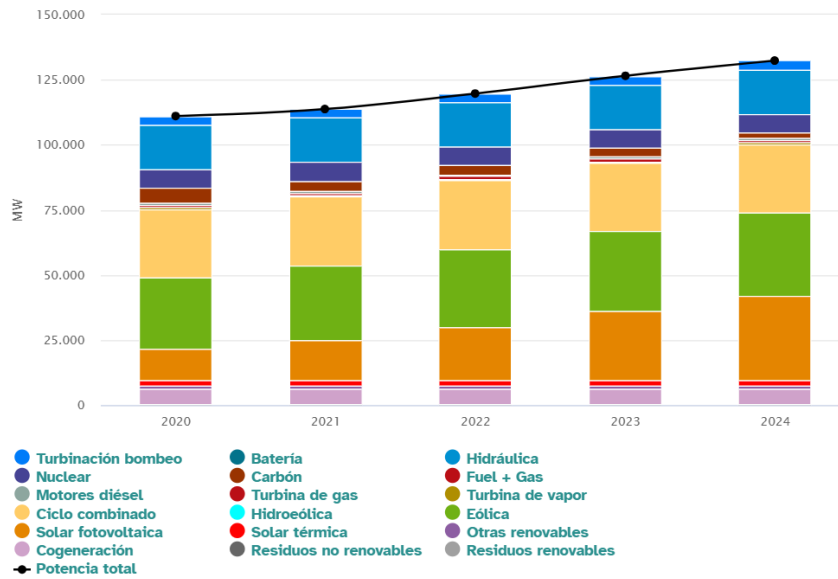


Figura 11. Evolución de la Potencia Eléctrica Instalada Acumulada. **Fuente:** [9]

Este impulso se ha traducido en un cambio significativo en la composición del parque generador peninsular, donde la energía solar fotovoltaica se convirtió en la tecnología con mayor potencia instalada en 2024 (31.719 MW), superando a la eólica (31.452 MW). Paralelamente, la potencia de generación no renovable se ha reducido, en parte por el cierre de centrales térmicas. [9]

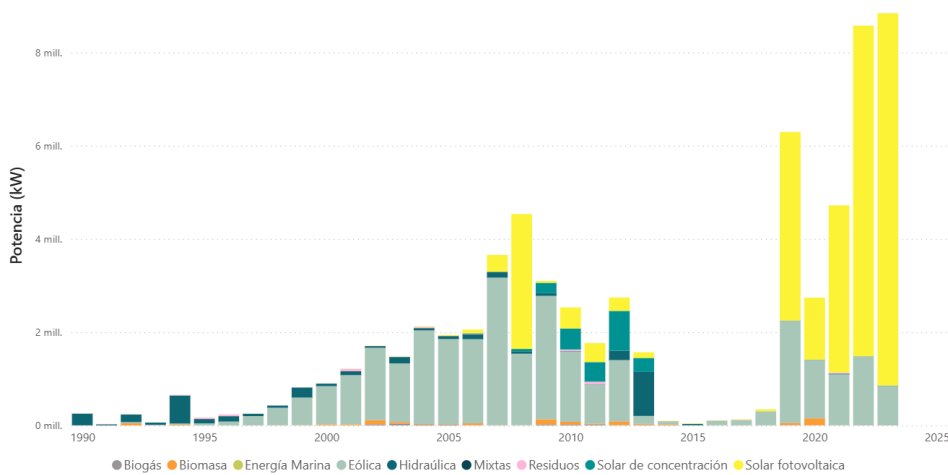


Figura 12. Evolución Potencia Eléctrica Instalada. **Fuente:** [8]

En cuanto a la generación de electricidad, las energías renovables alcanzaron un máximo histórico de 148.999 GWh en 2024, representando el 56,8% del mix nacional, superando las no renovables por segundo año consecutivo. Este logro fue posible gracias al gran aumento de la producción hidráulica (+35,5%) y solar fotovoltaica (+18,9%), mientras que la generación a partir de fuentes no renovables disminuyó. La generación sin emisiones de CO2 equivalente también batió un récord, situándose en el 76,8% de la producción total. [10]

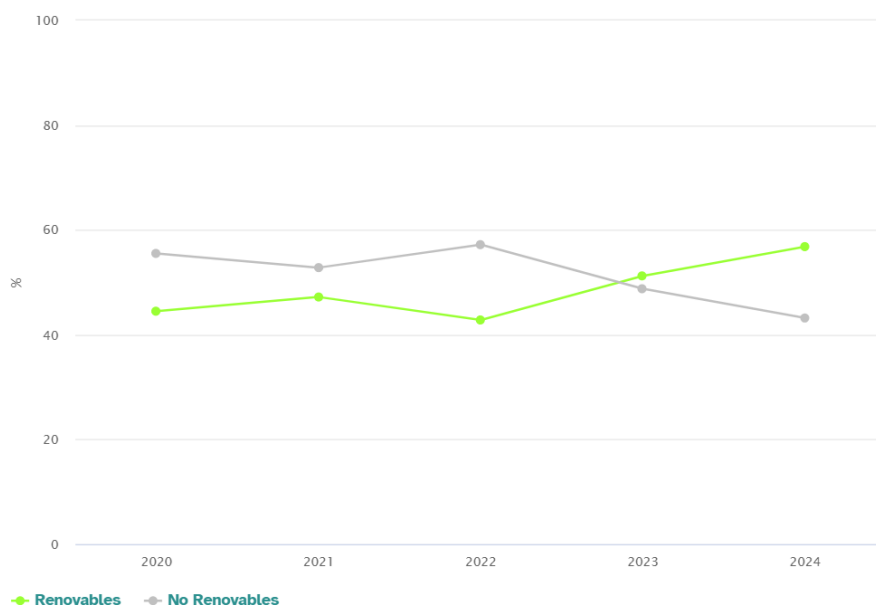


Figura 13. Evolución de la Generación Eléctrica Renovable y No Renovable. **Fuente:** [10]

2.3.2.4 Estrategias para la transición energética

España ha adoptado una intensa agenda de transición ecológica que la posiciona estratégicamente para liderar el cambio energético. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [11] es la herramienta clave que guía esta transformación, integrando las políticas energéticas y climáticas del país con un horizonte temporal a 2030, en consonancia con los objetivos europeos.

El PNIEC se presenta como una oportunidad para la modernización económica, la creación de empleo sostenible, la mejora de la salud ambiental y el desarrollo rural. La implementación de sus políticas permite a España aspirar a ser un referente en transición energética, generando beneficios como:

- Prosperidad y seguridad energética.
- Generación de empleo industrial y de calidad.
- Innovación y desarrollo tecnológico.
- Reducción de la pobreza energética.

Esta transformación se concreta en los siguientes objetivos para 2030:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del **32%** respecto a 1990.
- **48%** de energías renovables en el consumo final de energía.
- Mejora del **43%** en la eficiencia energética.
- **81%** de la generación eléctrica a partir de fuentes renovables.
- Reducción de la dependencia energética a un **50%**.

2.3.3 Autoconsumo

El autoconsumo se define como la generación de electricidad en el mismo punto de consumo o en un punto cercano [12]. Este modelo no solo permite a los consumidores participar activamente en la transición energética y en la lucha contra el cambio climático, sino que también ofrece importantes beneficios económicos.

Entre las ventajas más destacadas del autoconsumo se incluyen:

- **Autonomía del consumidor:** Reduce la dependencia de las grandes compañías eléctricas.
- **Ahorro económico:** Disminuye el coste de la factura eléctrica.
- **Impacto ambiental:** Contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

- **Eficiencia:** Minimiza las pérdidas de energía en el transporte y distribución.
- **Creación de empleo:** Fomenta la generación de empleo local, estable y cualificado.

Históricamente, el autoconsumo surgió como una solución para zonas aisladas de la red. Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos y a la reducción de costes, hoy en día se ha convertido en una alternativa rentable y adaptable para cualquier tipo de consumidor, tanto a nivel doméstico como industrial. Dada la abundante radiación solar en España, el autoconsumo fotovoltaico es la tecnología más extendida [13], aunque otras opciones como la minieólica son viables en emplazamientos con buen recurso. Además, la hibridación de distintas tecnologías renovables permite maximizar la eficiencia y el aprovechamiento de los recursos energéticos.

2.3.3.1 Marco regulatorio y tipologías de autoconsumo en España

La regulación del autoconsumo en España se rige principalmente por el **Real Decreto 244/2019** [14], que establece las condiciones técnicas y económicas de las instalaciones. Esta normativa simplifica la tramitación y define varias modalidades.

- **Autoconsumo sin excedentes:** En esta modalidad de autoconsumo, se evita el vertido de energía a la red [15].
- **Con excedentes acogidos a compensación:** El exceso de energía que se genera se vierte a la red, recibiendo una compensación económica en la factura de luz. El valor de esta compensación no puede ser superior al coste de la energía consumida al mes [15].
- **Con excedentes no acogidos a compensación:** El propietario de la instalación podrá verter energía a la red, recibiendo un beneficio económico, en este caso, se aplica la normativa general de la actividad de producción [15].

Dentro de la normativa, se contempla el autoconsumo colectivo, donde la instalación es compartida por una comunidad de vecinos, industrias o locales comerciales.

Además, la normativa ha facilitado la integración de sistemas de almacenamiento y ha simplificado los trámites administrativos para instalaciones de menor tamaño, hasta 15kw [16].

2.3.3.2 Incentivos económicos y objetivos estratégicos

Para fomentar la adopción del autoconsumo, se han implementado programas de incentivos que varían según el tipo de tecnología y el sector. Estas ayudas, que pueden ser porcentajes sobre los costes o importes fijos unitarios, buscan reducir la inversión inicial necesaria para instalaciones de energías renovables en el sector residencial, como pueden ser, fotovoltaica, eólica, aerotermia, solar térmica o biomasa, o para la incorporación de almacenamiento. (aerotermia, solar térmica, biomasa, geotermia). Estos programas de incentivos se recogen en el Real Decreto 477/2021 [17], de 29 de junio, por el que se aprueba la concesión directa a las comunidades autónomas y a las ciudades de Ceuta y Melilla de ayudas para la ejecución de diversos programas de incentivos ligados al autoconsumo y al almacenamiento, con fuentes de energía renovable. Y el Real Decreto 377/2022 de 17 de mayo por el que se amplía la tipología de beneficiarios [18].

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [11] reconoce el autoconsumo como un vector clave para la transición energética, estableciendo un objetivo de 19 GW de autoconsumo solar para 2030. Este plan busca reforzar el papel del ciudadano en la producción, consumo y venta de su propia energía, y considera el autoconsumo fundamental para alcanzar el objetivo del 48% de penetración renovable en el uso final de la energía [15].

Desde una perspectiva técnica, la creciente integración de pequeñas instalaciones de autoconsumo plantea un reto para la operación del sistema eléctrico. Por ello, es necesario adaptar la red para garantizar un suministro seguro y fiable, promoviendo que estas instalaciones cumplan con ciertos requisitos técnicos y permitan su visibilidad y operatividad en tiempo real.

2.3.4 Tipos de energías renovables en entornos domésticos

2.3.4.1 Solar térmica

La energía solar térmica o termosolar aprovecha la radiación del sol para producir calor, a diferencia de la energía fotovoltaica que genera electricidad. Este calor se capta mediante dispositivos como paneles solares y termosifones, y se almacena en depósitos para un uso continuado. Esta tecnología permite calentar agua para uso doméstico, climatizar edificios o incluso generar energía mecánica y eléctrica en plantas termosolares. Al ser una fuente de energía renovable, contribuye a la lucha contra el cambio climático al reducir las emisiones contaminantes y la dependencia de los combustibles fósiles. [19]

Contexto y situación en España

España tiene un gran potencial para la energía solar térmica debido a su alta cantidad de horas de sol. La potencia instalada ha sido estable desde 2014, alcanzando los 2,302 MW a finales de 2024, con un notable aumento previo en 2012. La mayor parte de esta capacidad se encuentra en el sur y suroeste del país, con Andalucía y Extremadura como las regiones líderes [20].

En cuanto a la generación, la energía solar térmica ofrece una producción diaria más homogénea que la fotovoltaica, gracias a su capacidad de almacenar calor y liberarlo en horas sin sol. Esto la convierte en una alternativa viable para reducir la dependencia energética de España [21].

Requisitos para la instalación

Para que una instalación solar térmica en una vivienda sea eficiente y duradera, es crucial prestar atención a varios requisitos, desde la planificación inicial hasta el mantenimiento. El primer paso es seleccionar la configuración adecuada según las necesidades y el tamaño del edificio. Para viviendas pequeñas con instalaciones de hasta 10 m² de superficie de captación, lo más recomendable es optar por sistemas prefabricados. Estos sistemas están diseñados para un montaje sencillo y fiable, lo que elimina el riesgo de errores en el diseño. La elección entre un sistema de termosifón o de circulación forzada dependerá de la construcción de la vivienda y de las condiciones climáticas del lugar, como la radiación solar y la temperatura ambiente. [22]



Figura 14. Ejemplos de sistemas prefabricados, termosifón y forzados. **Fuente:** [22]

Una vez definida la configuración, es esencial seleccionar los componentes y materiales correctos para asegurar la durabilidad de la instalación. Para la producción de agua caliente sanitaria (ACS), lo ideal es utilizar

captadores de baja temperatura (planos), ya que son suficientes para el incremento de temperatura requerido y más económicos. Es fundamental que todos los componentes, especialmente los que estarán a la intemperie (como el aislamiento), sean resistentes a condiciones extremas como la radiación UV, la lluvia y las heladas. Invertir en materiales de mayor calidad inicialmente puede parecer más costoso, pero se amortiza a largo plazo al reducir la necesidad de mantenimiento y reparaciones. [22]

El diseño y la integración arquitectónica de la instalación también son aspectos clave. Se debe buscar un lugar soleado de forma continua para los captadores, preferiblemente orientado al sur geográfico, aunque una desviación de hasta $\pm 45^\circ$ no afectará significativamente su rendimiento. El campo de captadores debe estar libre de sombras para evitar problemas de funcionamiento. Además, el sistema de acumulación debe tener un volumen suficiente para almacenar la energía diaria, con una relación recomendada de al menos 75 litros por cada metro cuadrado de captador. Los recorridos del circuito hidráulico deben ser lo más cortos posible para minimizar las pérdidas de calor y los costes. [22]

Finalmente, el mantenimiento regular es indispensable para garantizar la vida útil de la instalación. Un buen plan de mantenimiento, que incluya revisiones periódicas, puede hacer que un sistema solar térmico funcione de forma óptima durante 25 o 30 años. Por el contrario, un sistema descuidado puede volverse inservible en pocos años, por lo que es vital asegurarse de que se mantenga adecuadamente, por ejemplo, rellenando el líquido anticongelante cuando sea necesario para evitar daños por heladas. [22]

Beneficios y desventajas

La energía solar térmica es una fuente de energía renovable, limpia y sostenible que no produce ruidos ni olores significativos. A largo plazo, genera un importante ahorro económico al reducir la factura energética. Las instalaciones tienen bajos requerimientos de mantenimiento y una larga vida útil (aproximadamente 20 años o más con el cuidado adecuado). Su uso fomenta la innovación y contribuye a una economía más limpia.

Sin embargo, para funcionar de manera óptima, requiere de una correcta instalación y un mantenimiento regular para evitar fallos. Las instalaciones descuidadas pueden volverse inservibles en pocos años. Por ejemplo, la falta de anticongelante en climas fríos puede causar daños por heladas. La inversión inicial puede ser considerable, aunque se amortiza con el tiempo.

Conclusión

La energía solar térmica es una tecnología madura y confiable que juega un papel vital en la transición hacia una sociedad más sostenible. Al proporcionar una forma eficiente y económica de aprovechar un recurso gratuito y abundante, reduce las emisiones de carbono y la dependencia de combustibles fósiles. Su capacidad para ser integrada en edificios de diversos sectores (residencial, industrial y agropecuario) y su facilidad de mantenimiento la convierten en una opción prometedora y práctica para el futuro energético.

2.3.4.2 Solar fotovoltaica

Definición e Introducción

La energía fotovoltaica se define como la conversión directa de la radiación solar en electricidad a través de paneles solares. Este proceso, conocido como efecto fotovoltaico, se produce en dispositivos semiconductores donde la luz solar excita los electrones, generando una corriente eléctrica. A pesar de que este efecto se conoce desde el siglo XIX, su desarrollo y aplicación a gran escala se impulsó en la década de los 50, durante la carrera espacial, para el suministro de energía a satélites. [23]

Una característica clave de esta tecnología es su modularidad, que permite su adaptación a diversas escalas, desde grandes plantas de energía hasta pequeñas instalaciones residenciales en tejados. [23]

Contexto y situación en España

El año 2024 marcó un período de maduración y estabilización para el autoconsumo fotovoltaico en España. Aunque se instalaron 1.431 MW, lo que representa el segundo año consecutivo de contracción en la nueva

potencia, a pesar de la desaceleración sufrida en la instalación, el sector ha multiplicado por más de 420 su capacidad total desde 2015, superando la barrera de los 8 GW acumulados, manifestando una consolidación y madurez de esta tecnología. [24]

De la potencia instalada en 2024, el 24% (346 MW) correspondió a 73.398 instalaciones residenciales, con un tamaño medio de 4,7 kW. Esta cifra supuso una reducción del 34,4% en el número de instalaciones respecto al año anterior. A pesar de ello, el precio medio de las instalaciones ha continuado disminuyendo, lo que refleja el efecto de la curva de aprendizaje de la tecnología y la hace más accesible. [24]

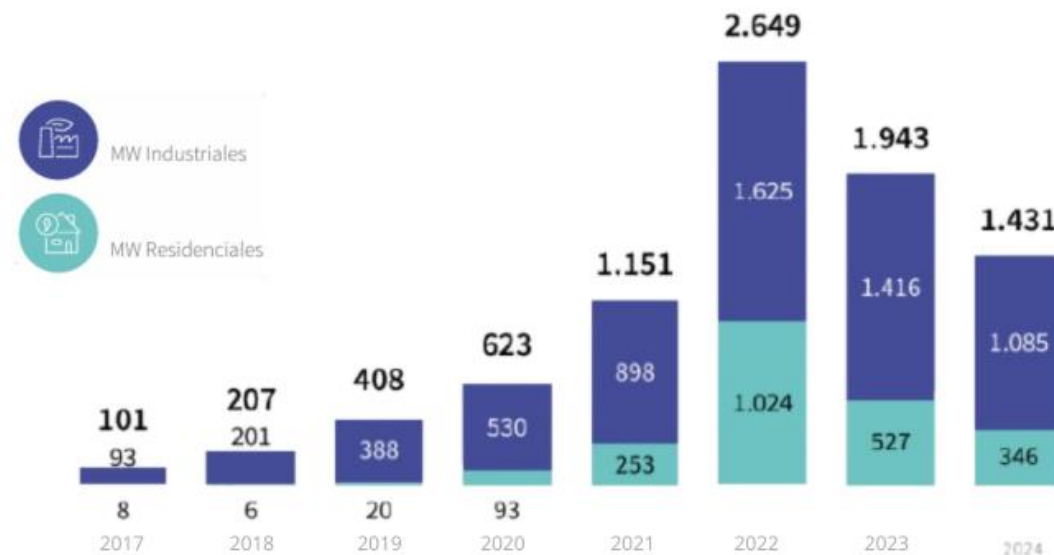


Figura 15: Evolución potencia fotovoltaica de autoconsumo instalada. **Fuente:** [24]

Geográficamente, el autoconsumo se concentra principalmente en tres comunidades autónomas: Cataluña, Andalucía y la Comunidad Valenciana, que aglutinan casi el 50% de la potencia total instalada en el país. [24]

Requisitos para la instalación

Equipar una vivienda con un sistema de autoconsumo es un proceso cada vez más sencillo. Los componentes esenciales para una instalación básica son:

- Un **espacio adecuado** para colocar los paneles solares, generalmente el tejado. La orientación e inclinación son cruciales para maximizar la captación de luz solar. [25]
- Un **inversor de corriente** para convertir la energía continua de los paneles en corriente alterna, compatible con la red eléctrica.

Adicionalmente, para optimizar la rentabilidad y el uso de la energía, se pueden añadir otros elementos como:

- Una **batería de acumulación** para almacenar la energía sobrante y utilizarla cuando los paneles no estén generando, por ejemplo, durante la noche.
- Un **cargador para vehículos eléctricos** que permita aprovechar la electricidad autogenerada para la movilidad.

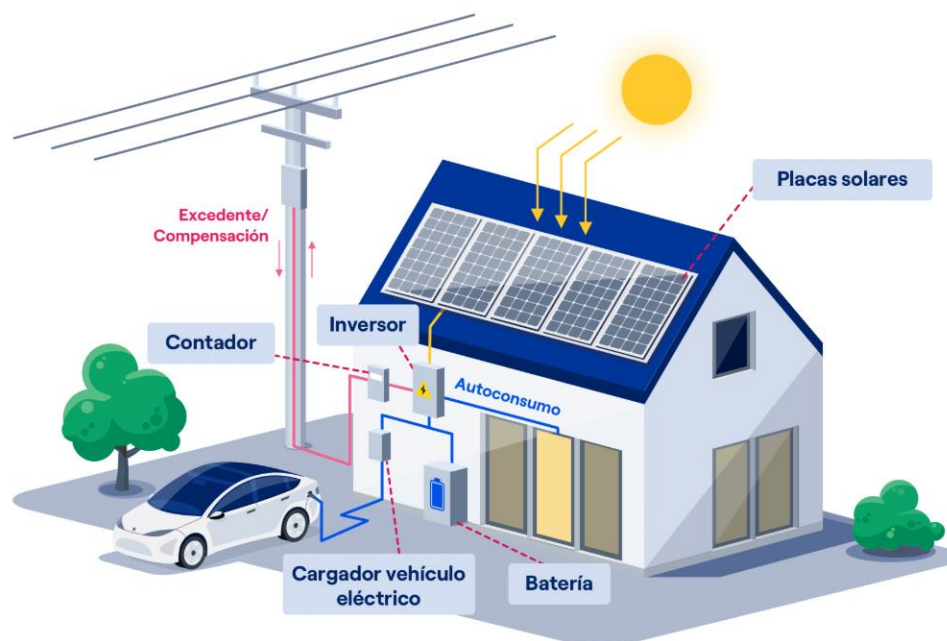


Figura 16. Instalación Fotovoltaica con Almacenamiento, Cargador de VE y Vertido a Red. **Fuente:** [26]

En la mayoría de los casos, la forma más segura de realizar una instalación es a través de una empresa especializada que se encarga de todos los pasos, desde la elaboración del presupuesto y la visita técnica hasta la instalación y la gestión de la documentación necesaria para la conexión a la red. [26]

Beneficios y desventajas

Beneficios

- **Ahorro económico:** Las instalaciones residenciales pueden lograr ahorros superiores al 50% en la factura de la luz, lo que proporciona estabilidad ante las fluctuaciones de los precios de la energía.
- **Sostenibilidad:** El autoconsumo contribuye a la transición energética al utilizar una fuente renovable, inagotable y limpia. Al consumir la energía en el lugar de producción, se evitan las pérdidas asociadas al transporte.
- **Amortización rápida:** Aunque la inversión inicial es significativa, el ahorro constante en la factura permite una rápida amortización del sistema, que se estima en menos de 10 años. Con las ayudas y beneficios fiscales actuales, este plazo puede reducirse a menos de 5 años.
- **Ventajas adicionales:** Existen ayudas directas y beneficios fiscales, que fomentan la adopción de esta tecnología.

Desventajas y retos

- **Inversión inicial:** Aunque la caída de los precios de los equipos y las expectativas de reducciones en la factura eléctrica creen cierto atractivo al largo plazo, el desembolso económico inicial puede representar una barrera significativa para muchos hogares. No obstante, se debe considerar esta inversión no como un gasto, sino como una amortización. Convirtiendo esta desventaja en una ventaja a futuro.
- **Gestión de excedentes:** En 2024, el informe destacó que un 19% del potencial de la capacidad de autoconsumo no se aprovechó, lo que equivale a una pérdida económica de 88 millones de euros. Esto se debe a barreras regulatorias y técnicas que impiden verter los excedentes a la red. Para aprovechar al máximo la energía, es necesario gestionar los excedentes. Aunque existe la compensación simplificada

que permite descontar la energía vertida de la factura, está sujeta a un límite económico que impide una compensación superior a la del consumo de la red. [24]

Conclusión

El autoconsumo fotovoltaico en España ha demostrado ser una tecnología madura y consolidada, con un crecimiento exponencial desde 2015. A pesar de la desaceleración de 2024, su potencial es innegable. Para alcanzar los ambiciosos objetivos del PNIEC de 19 GW para 2030, es fundamental superar los desafíos regulatorios y técnicos, en particular aquellos que limitan el aprovechamiento de los excedentes. La simplificación de trámites y un marco fiscal favorable serán clave para continuar incentivando la adopción de esta tecnología, que no solo beneficia económicamente a los consumidores, sino que también es vital para la transición energética y la lucha contra el cambio climático.

2.3.4.3 Minieólica

La mini eólica es una tecnología que aprovecha la energía cinética del viento para generar electricidad a través de aerogeneradores de baja potencia, generalmente inferiores a los 100 kW [27]. A diferencia de la eólica a gran escala, su tamaño reducido permite la instalación para el autoconsumo en espacios más limitados, ofreciendo una alternativa a los paneles solares. El funcionamiento se basa en el movimiento de las palas del rotor, que, impulsadas por el viento, convierten la energía cinética en energía mecánica. Un generador eléctrico, conectado al rotor, transforma posteriormente esta energía mecánica en electricidad. Para maximizar la producción, estos aerogeneradores están equipados con un timón que los orienta según la dirección del viento y con un limitador de potencia por seguridad. Los modelos más extendidos son los de eje horizontal por su eficiencia, aunque las soluciones de eje vertical han ganado popularidad en entornos urbanos donde el espacio es una limitación [28].

Crecimiento y contexto en España

A nivel de generación, la energía eólica se ha consolidado como la principal fuente de producción en España, representando un 23,2% de la combinación total de generación en 2024 [29]. A pesar de un ligero descenso anual, se registraron récords de producción mensual y diaria. En cuanto a la producción por comunidades autónomas, Castilla y León se mantiene como líder, seguida de Aragón, que también destaca por la alta proporción de energía eólica en su mix energético [29].

En cuanto al autoconsumo eólico en España, ha experimentado un crecimiento notable, impulsado por una mayor conciencia social sobre la necesidad de transicionar hacia energías renovables. La aprobación del Real Decreto de Autoconsumo en 2019 [14] fue un factor clave, al establecer un marco regulatorio que eliminó barreras previas. Además, las líneas de ayuda lanzadas en 2022 han contribuido a reducir la inversión inicial, fomentando su desarrollo en proyectos industriales y residenciales. La industria eólica española cuenta con una gran experiencia a nivel mundial y alberga fabricantes de turbinas de pequeña y mediana potencia, lo que facilita la expansión de esta tecnología en el mercado nacional [30].

Zonas y requisitos para la instalación

Basándonos en el Atlas Eólico Mundial [31] España presenta un potencial eólico significativo, especialmente en las zonas costeras y montañosas. Las regiones más adecuadas para la instalación de aerogeneradores son aquellas con alta exposición a flujos de aire persistentes, como la costa noroeste de Galicia, la cornisa cantábrica y el área del Estrecho de Gibraltar. También, zonas elevadas del interior, como sistemas montañosos, presentan un potencial considerable.

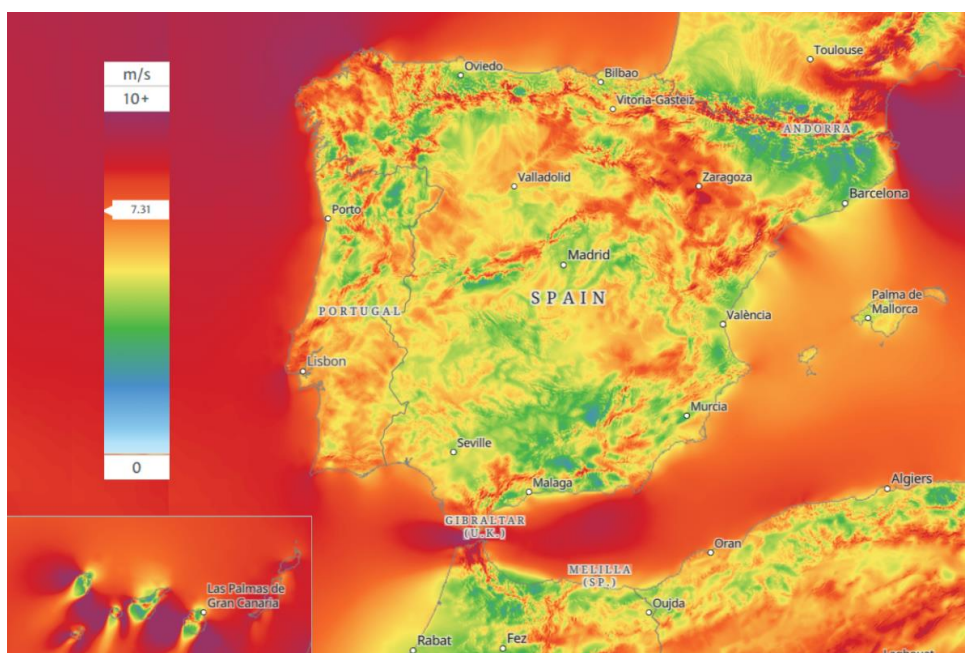


Figura 17. Mapa Eólico de la Península Ibérica y las Islas Canarias. **Fuente:** [31]

Para la instalación de un sistema de mini eólica, es fundamental cumplir con una serie de requisitos, como obtener los permisos del municipio y, si procede, de la comunidad de vecinos. El emplazamiento debe contar con un espacio adecuado y, lo más importante, una velocidad del viento recurrente, ya que los aerogeneradores solo comienzan a funcionar a partir de los 3 metros por segundo. Se recomienda una instalación a una altura mínima de 8 metros para captar las corrientes de aire más estables [27].

Beneficios y desventajas

La mini eólica ofrece múltiples beneficios, como su carácter de energía limpia y sostenible que no genera emisiones. Es una fuente de energía gratuita que permite un importante ahorro económico y cuya inversión es amortizable a corto plazo. Además, su capacidad de generar electricidad por la noche o en días nublados la convierte en un complemento ideal para las instalaciones solares fotovoltaicas, asegurando un suministro más estable. También es una solución eficiente para lugares alejados de la red eléctrica [27].

Sin embargo, esta tecnología presenta ciertas desventajas. La principal es su dependencia directa del viento, lo que puede llevar a una producción insuficiente o, en caso de vientos excesivamente fuertes, a la detención del sistema por motivos de seguridad. Otros inconvenientes que considerar son el riesgo para la fauna local y la posible contaminación acústica, por lo que es vital elegir aerogeneradores con la eficiencia energética adecuada para evitar ruidos molestos [27].

Conclusión

La energía mini eólica representa una solución prometedora y en expansión para el autoconsumo en España [30], reforzando la transición hacia un modelo energético más sostenible y descentralizado. Su capacidad para generar electricidad de forma limpia, económica y complementaria a otras fuentes como la solar, la posiciona como un pilar fundamental en la estrategia de descarbonización del país. Gracias a un marco regulatorio favorable y al liderazgo de la industria nacional, esta tecnología ha demostrado su viabilidad. A pesar de los desafíos relacionados con la variabilidad del viento y los requisitos de ubicación, el autoconsumo eólico se

perfila como una herramienta clave para alcanzar una mayor independencia energética y reducir la huella de carbono a nivel tanto residencial como industrial.

2.3.4.4 Biomasa

La biomasa, tal como se define en la Directiva de la Unión Europea 2018/2001 [32], abarca la fracción biodegradable de productos, residuos y desechos de origen biológico provenientes de actividades como la agricultura, la silvicultura, la pesca, y los residuos industriales y urbanos. Es, en esencia, materia orgánica utilizada como fuente de energía. Esta materia orgánica, que puede ser tan variada como la poda de olivo, los huesos de aceituna o las astillas de madera, se convierte en un biocombustible al ser procesada [33]. Estos biocombustibles pueden ser sólidos (como pellets o astillas), líquidos (biocombustibles) o gaseosos (biogás), y su energía puede transformarse en calor, electricidad o energía mecánica.

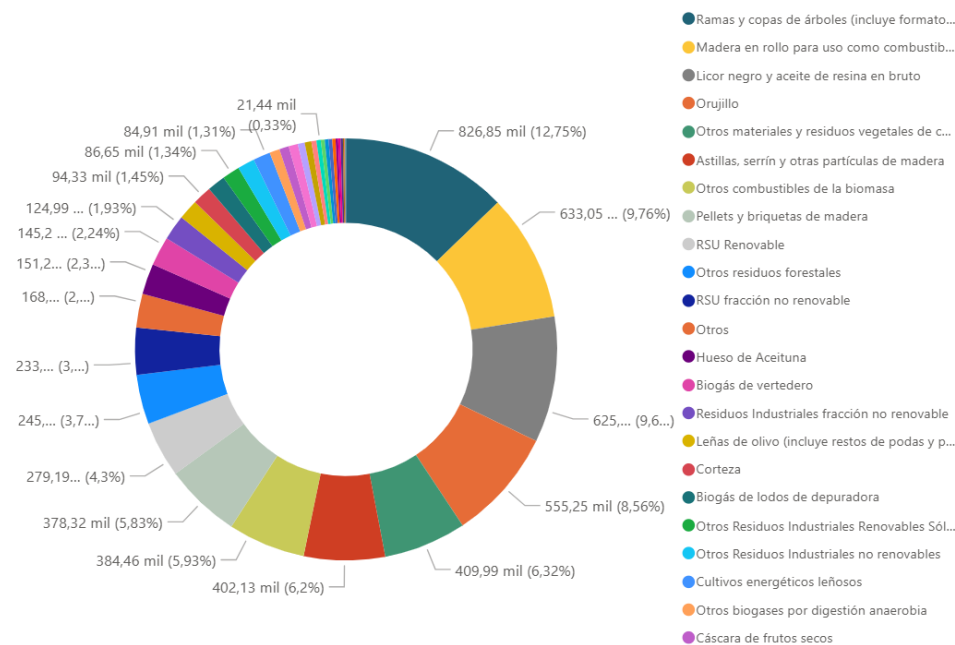


Figura 18. Consumo de Energía (tep) por Fuentes (Biomasa y Biogás). **Fuente:** [34]

Contexto en España

En España existe una clara disparidad en el uso de biomasa para la generación de potencia eléctrica frente a la térmica. A nivel nacional, la potencia térmica (16.055.239 kW) es significativamente mayor que la potencia eléctrica (1.177.840 kW). Las comunidades autónomas de Andalucía, Castilla y León y Galicia lideran la potencia instalada. Por ejemplo, en Andalucía, la potencia térmica alcanza los 3.934.685 kW, mientras que la eléctrica es de 266.280 kW. Esta dominancia del uso térmico sobre el eléctrico sugiere que la biomasa se aprovecha de manera más eficiente o se destina a aplicaciones donde su valor energético se maximiza en forma de calor en lugar de electricidad [34].

Basándonos en los datos proporcionados, el consumo de biomasa en el sector residencial demuestra una notable homogeneidad entre los entornos rurales (1.310.973 hogares) y urbanos (1.238.271 hogares) [34], desmitificando la idea de que su uso es exclusivo de las zonas rurales. A pesar de que el número de hogares que consumen biomasa es similar entre las zonas rurales y urbanas, la mayor potencia y consumo se localizan en las regiones con una fuerte presencia de sectores industriales (como el agroalimentario en Andalucía) [35] o con una alta demanda de calor residencial. Es por ello que la biomasa ha supuesto una oportunidad muy beneficiosa en la gestión de montes y un impulso socioeconómico en áreas rurales.

Instalación y usos principales de la biomasa



Figura 19. Ejemplos de Implementación de Biomasa en Hogares. Estufa de Leña y Chimenea. **Fuente:** [36]

El uso predominante de la biomasa en hogares es para la producción de energía térmica, lo que se utiliza principalmente para calefacción, agua caliente sanitaria y cocinas. Los equipos más utilizados son las estufas y chimeneas, especialmente en las zonas climáticas continentales, donde se requiere de una mayor demanda de calor para calefacción. Estas instalaciones son una opción común para la calefacción de una o dos estancias. Sin embargo, si se trata chimeneas antiguas como las de hogar abierto, presentan una eficiencia muy baja, sistemas más modernos, "insertables" o los sistemas de estufas canalizables mejoran significativamente el rendimiento. Para sistemas de calefacción centralizada y agua caliente, se emplean calderas, cuya instalación es más compleja ya que requiere componentes adicionales como silos de almacenamiento para el combustible, alimentadores de combustibles y acumuladores de inercia, aumentando la inversión inicial, pero aprovechando mejor el recurso en el largo plazo [36].

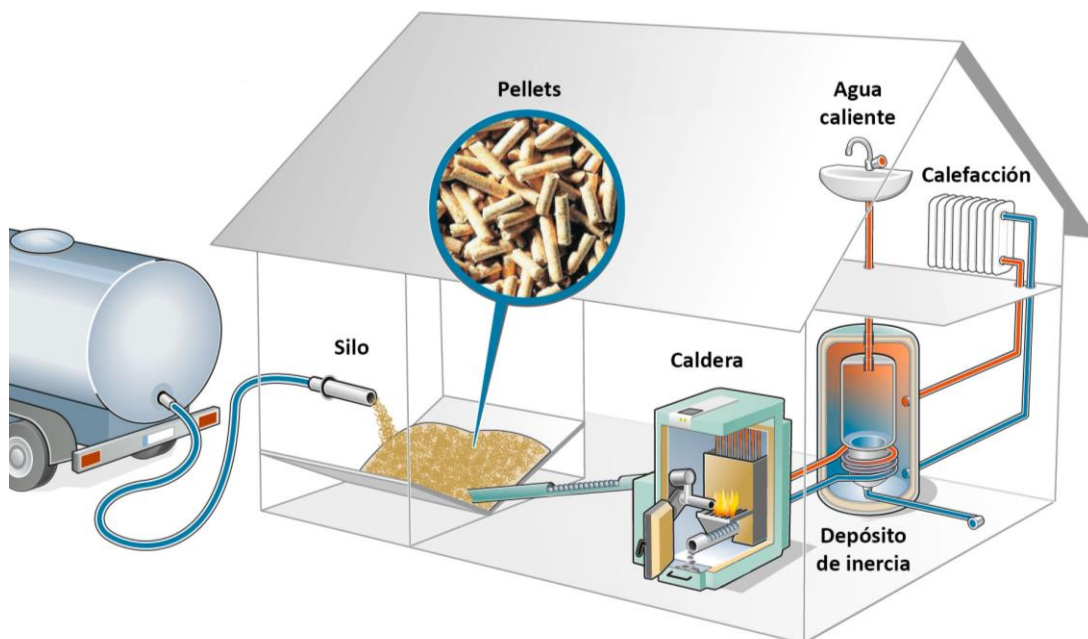


Figura 20. Esquema de instalación de biomasa en el sector residencial. **Fuente:** [36]

Beneficios y Desventajas

La biomasa ofrece importantes beneficios que la posicionan como una fuente de energía estratégica. Al ser considerada neutra en emisiones de CO₂, su combustión no añade gases de efecto invernadero a la atmósfera en un balance neto, dado que el carbono liberado es el mismo que las plantas absorbieron durante su crecimiento. Además, como se ha mencionado, su explotación fomenta la gestión forestal, reduciendo el riesgo de incendios, y genera empleo en las zonas rurales, contribuyendo a la cohesión territorial. Sumado a esto, los avances tecnológicos han permitido la creación de equipos con altos rendimientos, reduciendo el consumo de combustible y las emisiones de partículas, y la automatización de procesos facilita su uso.

No obstante, existen desventajas a considerar. El coste inicial de instalación de calderas de biomasa puede ser elevado en comparación con sistemas convencionales. El uso de equipos antiguos o de combustibles de baja calidad puede resultar en una combustión ineficiente y en mayores emisiones, además de existir un alto riesgo de incendio si no se toman las medidas de seguridad adecuadas [36].

Conclusión

En resumen, la biomasa se ha establecido como un pilar fundamental en la estrategia de energías renovables de España, con una clara orientación hacia las aplicaciones térmicas. El análisis de su consumo y de las instalaciones existentes demuestra una versatilidad en aplicaciones domésticas. Si bien se enfrentan desafíos como la inversión inicial, la biomasa ofrece ventajas indiscutibles siendo un recurso local que promueve la sostenibilidad ambiental, la eficiencia energética y el desarrollo rural. Su papel en la transición energética es crucial, ya que permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático, consolidando su posición como una de las alternativas más prometedoras y sostenibles del panorama energético español.

2.4. Beneficios de la combinación IoT y energías renovables

2.4.1 Introducción

El uso de energías renovables, en particular la energía fotovoltaica, ha crecido significativamente en el sector residencial, convirtiéndose en una opción popular y accesible para los hogares. Este auge ha dado lugar a la figura del prosumidor, un consumidor que también produce su propia energía solar para el autoconsumo [5]. Sin embargo, la naturaleza intermitente de la radiación solar presenta un desafío importante, ya que los niveles de producción de energía fluctúan a lo largo del día [37]. Para superar este obstáculo, el Internet de las Cosas (IoT) se presenta como una solución clave, ofreciendo la capacidad de monitorear y gestionar de forma inteligente el sistema energético doméstico [5]. Esto permite a los prosumidores maximizar el uso de su propia energía, reducir la dependencia de la red eléctrica y obtener un mayor control sobre su consumo

2.4.2 Monitoreo y Optimización del Rendimiento

La implementación del IoT facilita la evaluación precisa y el mantenimiento de los sistemas de energía renovable, lo que resulta en una producción más eficiente:

- **En placas fotovoltaicas:** Sensores IoT permiten el monitoreo en tiempo real de parámetros como la radiación, la temperatura y la acumulación de suciedad en los paneles [38]. Esto ayuda a identificar problemas como el sombreado parcial o la suciedad, permitiendo resolverlos rápidamente para evitar daños y asegurar una producción constante y optimizada [37].
- **Turbinas eólicas:** La tecnología IoT es fundamental para el mantenimiento predictivo. Al analizar datos sobre el estado de las turbinas, se pueden prever fallas y realizar mantenimientos antes de que ocurran, minimizando el tiempo de inactividad y los costos operativos. Además, los datos ambientales

recopilados permiten ajustar el ángulo y la orientación de las turbinas para maximizar la generación de energía [38].

- **Análisis de datos avanzados:** La gran cantidad de información generada por los dispositivos IoT se puede analizar con inteligencia artificial y macrodatos (big data) para obtener información detallada [39]. Esto ayuda a predecir futuras fallas y a optimizar el rendimiento y la fiabilidad de las redes eléctricas [38].

2.4.3 Gestión Eficiente de la Red y la Demanda

El IoT permite una gestión inteligente de la energía para equilibrar la oferta y la demanda de manera dinámica y cooperativa:

- **En microrredes:** Los dispositivos IoT en las microrredes pueden comunicarse entre sí para autogestionarse. Esto les permite compensar las fluctuaciones en la generación y la demanda. A través de la gestión del lado de la demanda, los aparatos pueden ajustar su funcionamiento para coincidir con los periodos de mayor producción solar, reduciendo el desequilibrio con la red principal [39].
- **En sistemas residenciales:** Sistemas de gestión de carga basados en IoT, permiten a los consumidores maximizar el autoconsumo. Un algoritmo inteligente programa el funcionamiento de los electrodomésticos para utilizar la energía producida por los propios paneles fotovoltaicos, minimizando la cantidad de energía comprada de la red y el excedente que se inyecta en ella [5].

2.4.4 Beneficios para el consumidor y el operador

La integración del IoT genera ventajas significativas tanto para quienes operan las plantas de energía como para los consumidores:

- **Control y acceso remotos:** Los operadores de grandes centrales pueden tomar decisiones y realizar ajustes sin estar físicamente presentes en la planta [38]. De manera similar, los prosumidores residenciales pueden acceder a sus datos de producción y consumo en cualquier momento y lugar a través de sitios web y aplicaciones móviles [5].
- **Eficiencia y ahorro:** Al optimizar la producción y el consumo, el IoT contribuye a una mayor eficiencia energética. Esto se traduce en un mayor rendimiento financiero para los operadores y en un autoconsumo incrementado para los prosumidores, lo que les permite reducir sus facturas de electricidad [5].
- **Seguridad y fiabilidad:** La capacidad del IoT para detectar problemas y el análisis de datos para predecir fallas aumenta la fiabilidad de los sistemas, garantizando un funcionamiento más seguro y estable [38].

2.4.5 Conclusión

La combinación del Internet de las Cosas y las energías renovables representa una revolución en la forma en que generamos, distribuimos y consumimos energía. Al superar los desafíos de las fuentes intermitentes, el IoT transforma los sistemas de energía en redes inteligentes, eficientes y fiables [39]. Sus beneficios abarcan desde la optimización del rendimiento en grandes centrales [38] y el equilibrio de microrredes, hasta el empoderamiento de los consumidores para gestionar su propio uso de energía a nivel doméstico [5]. Esto hace que el IoT sea una herramienta indispensable que acelera la transición hacia un futuro energético más sostenible y seguro para todos.

3 METODOLOGÍA

Para la metodología de diseño y evaluación económica del estudio. Se describe la modelización de los tres casos simulados de vivienda unifamiliar, definiendo sus cargas eléctricas y potencias contratadas (3,5 kW, 5 kW y 7,5 kW). Se explica la selección técnica de los equipos de energía solar fotovoltaica (FV) e IoT, justificando la elección de la FV como opción prioritaria de autoconsumo. Finalmente, se describe la metodología de cálculo empleada, detallando las fórmulas para la estimación del gasto eléctrico inicial, los ahorros por FV e IoT, y los criterios de evaluación financiera.

3.1 Descripción del caso simulado

El presente estudio de optimización económica y energética se centra en un caso simulado de una vivienda unifamiliar representativa situada en España. Si bien las viviendas en bloques son el tipo de residencia más común, representando aproximadamente el 70% del total, se ha optado por modelar una vivienda unifamiliar por su ventaja operativa: la implantación de medidas de ahorro recae en una única persona o núcleo familiar. Esta simplificación elimina la necesidad de consenso vecinal y las complejidades administrativas, permitiendo un análisis directo y eficiente de las posibles inversiones y reformas en la instalación eléctrica.

Para que el modelo ofrezca un escenario realista, se han establecido consideraciones específicas sobre las dimensiones de una propiedad media y sus ocupantes. Una residencia promedio con estas características tendría una superficie total de 135 m² y estará distribuida en aproximadamente 9 estancias, lo que se considera representativo para una vivienda unifamiliar en el contexto mediterráneo [1]. Respecto al número de habitantes, el tamaño medio del hogar en España se sitúa en 2,5 personas [40]. Estas variables demográficas y de infraestructura configuran el punto de partida esencial para la evaluación de las estrategias de gestión eléctrica.

La potencia eléctrica promedio contratada en España se sitúa en torno a los 4.5 kWp [41]. Para el presente estudio de optimización económica del consumo eléctrico, se han definido tres escenarios de potencia contratada en viviendas que giran en torno a este promedio.

- **Caso 1 (Consumidor 3,5 kW):** Este perfil corresponde a una vivienda de planta baja de aproximadamente 90 m, habitada por dos personas. El hogar cuenta con equipamiento esencial como lavadora, frigorífico con congelador integrado, microondas, vitrocerámica de tres fuegos, horno portátil y un equipo pequeño de aire acondicionado. La instalación eléctrica asumida para este consumidor es monofásica [42].
- **Caso 2 (Consumidor 5 kW):** Este escenario modela una casa adosada de 150 m totales, con cuatro ocupantes, un nivel de consumo que se sitúa alrededor del promedio nacional de potencia contratada. Presenta un equipamiento superior al caso de bajo consumo, pero su instalación se mantiene como monofásica [42].
- **Caso 3 (Consumidor 7,5 kW):** El tercer caso corresponde a un chalet de 150 m habitado por cinco personas. Este perfil se caracteriza por ser el de mayor consumo y por contar con un equipamiento más amplio y de mayor demanda. Debido a la alta potencia contratada, se modela con un suministro trifásico [42].

De esta forma, los tres casos representan un rango significativo de perfiles residenciales, permitiendo analizar la efectividad de las estrategias de gestión energética avanzada (que incluyen tanto el autoconsumo fotovoltaico como la gestión activa de la demanda mediante tecnología) en diferentes niveles de consumo.

3.2 Selección de tecnologías y equipos

3.2.1 Elección de la energía solar fotovoltaica como opción prioritaria en el autoconsumo

La selección de la energía solar fotovoltaica como la tecnología central de autoconsumo para este proyecto se fundamenta en su capacidad de expansión sin precedentes, su superioridad económica y su versatilidad, todo lo cual maximiza la premisa de que mayor capacidad instalada se traduce en mayor rentabilidad. Esta elección estratégica se confirma al contrastarla con el desempeño y las limitaciones inherentes de otras tecnologías renovables disponibles para el autoconsumo.

3.2.1.1 Hegemonía indiscutible en el crecimiento de capacidad

El análisis de la evolución histórica del sistema eléctrico demuestra la posición dominante de la FV. Tras un periodo de estancamiento entre 2012 y 2017, la potencia instalada anual experimentó una explosión de crecimiento sin precedentes a partir de 2018 [8]. Este auge ha sido impulsado de forma categórica por la FV, llevando las instalaciones anuales a máximos históricos cercanos a los 8 millones de kW [8]. Esta hegemonía reciente es la base de nuestra decisión, ya que asegura la disponibilidad de tecnología madura, cadenas de suministro robustas y un mercado competitivo.

Esta adopción masiva se refleja en el mercado de autoconsumo, donde la compra de un panel solar fotovoltaico es la elección del 99% de los usuarios que deciden generar su propia energía [25]. Esta adopción masiva se ha consolidado en sistemas de pequeña y gran escala: la capacidad total de autoconsumo del país (8.585 MW) se divide entre los 2.281 MW de instalaciones residenciales y los 6.304 MW del sector industrial, lo que confirma su versatilidad [24]. El dominio de la FV se mantiene firme, a pesar de la disminución en el número de proyectos ejecutados en 2024 (una reducción del 37,6% respecto a 2023), lo que posiciona a esta tecnología como la opción más segura y escalable [24].

3.2.1.2 Limitaciones de tecnologías competidoras (eólica)

Al evaluar otras alternativas, como la mini-eólica para el autoconsumo, se aprecian claras desventajas que disminuyen su atractivo.

Aunque es una opción de generación, presenta desafíos operativos significativos. Requiere condiciones de viento específicas, lo que puede resultar en la instalación parada demasiados días al año o, por el contrario, vientos excesivos que obliguen a detener su funcionamiento. Además, la eólica supone un riesgo potencial para la fauna. Crucialmente, su instalación en sectores residenciales, especialmente en entornos urbanos o con alta densidad de población, presenta la desventaja del ruido generado, lo que podría generar contaminación acústica y conflictos vecinales [27].

3.2.1.3 El Papel Complementario y Térmico de la Biomasa y la Solar Térmica

La biomasa y la solar térmica presentan un patrón de instalación de potencia eléctrica históricamente distinto al de la Fotovoltaica (FV), lo que la excluye para el autoconsumo eléctrico modularizado.

El verdadero valor de estas tecnologías radica en su uso para la producción de energía térmica, siendo este su destino predominante, especialmente en el sector residencial. Por lo tanto, mientras la biomasa y la solar térmica contribuyen a la diversificación energética del país como fuente de calor, su escala, costes operativos y complejidad logística no la hacen adecuada para la generación eléctrica de autoconsumo modularizado que busca este proyecto, un rol que la FV cumple de manera más eficiente [34].

3.2.1.4 Conclusión

La decisión de centrarse en la FV se justifica plenamente en su capacidad de ofrecer los mejores resultados y beneficios en entornos domésticos e industriales, incluyendo una reducción de hasta el 95% en la factura de la luz. Su modularidad, la caída continua de los precios de los paneles y su probado éxito masivo, contrastado con el estancamiento de la solar térmica y las limitaciones operativas y ambientales de otras tecnologías, reafirman a la Energía Solar Fotovoltaica como la elección tecnológica más sólida para garantizar la máxima rentabilidad y el éxito a largo plazo.

3.2.2 Selección de equipos para la instalación fotovoltaica

3.2.2.1 Módulos Fotovoltaicos

Para la correcta selección de un módulo fotovoltaico, es primordial considerar factores clave como, la Potencia Nominal la eficiencia, y la Innovación Tecnológica, que incluye características de diseño avanzadas, cruciales para optimizar el rendimiento energético. Adicionalmente, es vital evaluar la Cobertura de Garantía, que abarca tanto el respaldo del producto (defectos de fabricación) como la garantía de rendimiento y finalmente, el Balance Coste-Beneficio, que asegura un equilibrio óptimo entre el rendimiento técnico del módulo y su coste de adquisición para garantizar la viabilidad económica del proyecto [43].

Potencia

La capacidad de una celda solar para generar energía eléctrica varía según el punto de operación en el que se encuentre. El punto que produce la potencia eléctrica más alta se conoce como el Punto de Máxima Potencia (MPP).

Dado que la potencia en cualquier punto de trabajo se representa gráficamente como el área definida por el producto de la tensión V y la corriente I , esta área debe ser la máxima posible en el MPP.

La corriente y el voltaje correspondientes a este punto de potencia óptima se designan como I_{MPP} y V_{MPP} , respectivamente [44].

$$P_{MPP} = V_{MPP} \cdot I_{MPP}$$

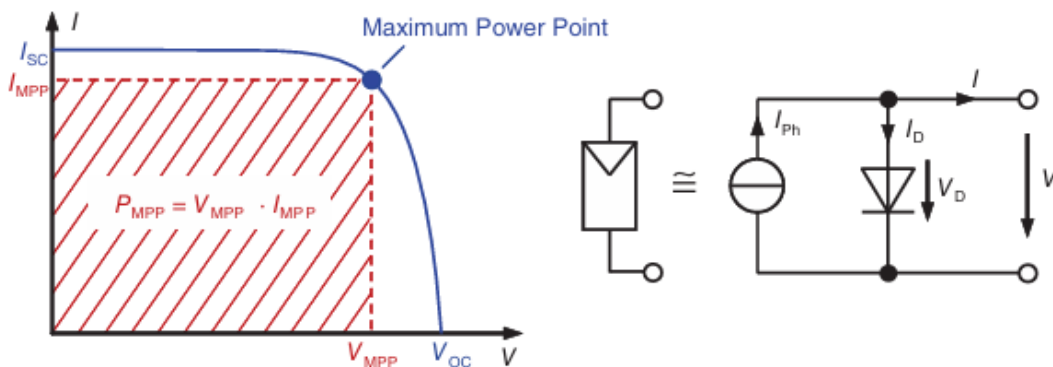


Figura 21. Punto de Máxima Potencia Gráficamente. **Fuente:** [44]

La potencia de un módulo solar se determina mediante un conjunto de criterios estandarizados denominados Condiciones de Prueba Estándar (STC). Estas condiciones actúan como un punto de referencia universal y se definen por tres factores clave:

1. **Irradiación:** La intensidad de la luz solar E debe fijarse en $E = E_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$, lo que simula la radiación solar total.
2. **Temperatura:** La temperatura operativa de las celdas en el módulo $\vartheta_{módulo}$ debe mantenerse a 25°C .
3. **Espectro Lumínico:** El espectro de luz solar se altera al atravesar la atmósfera terrestre. Este efecto es más pronunciado cuanto más largo es el trayecto que recorre la luz. Se utiliza una distribución espectral

de la luz estandarizada conocida como AM 1.5. Lo que quiere decir que la luz ha recorrido 1.5 veces la distancia en comparación con el trayecto vertical directo a través de la atmósfera (que sería AM 1).

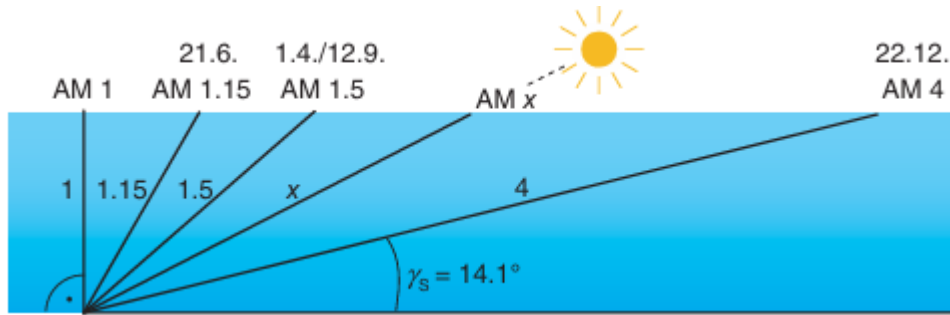


Figura 22. Explicación del término Air Mass. **Fuente:** [44]

La capacidad de generación de energía que el módulo exhibe bajo estos parámetros exactos se denomina potencia nominal. Se expresa en Vatios Pico W_p porque representa la potencia máxima teórica que el dispositivo puede entregar en condiciones ideales de prueba [44].

Eficiencia

La eficiencia de una celda solar describe qué porción de la potencia óptica P_{Opt} incidente en la celda se emite como energía eléctrica P_{MPP} . La cual se define como:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Opt}} = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{E \cdot A}$$

Siendo A el área del panel, E la irradiancia, V_{OC} tensión de circuito abierto, I_{SC} la corriente de cortocircuito y FF el factor de llenado, el cual se describe como la relación entre P_{MPP} y el producto entre V_{OC} y I_{SC} .

Las eficiencias típicas de las celdas de silicio cristalino están entre el 15% y el 22% [44].

Innovación Tecnológica

1. Células de Silicio Cristalino

La tecnología dominante en el mercado fotovoltaico es el silicio cristalino (c-Si), acaparando históricamente más del 85% de la cuota mundial. El silicio está disponible de forma ilimitada y es el material semiconductor fundamental. Dentro del c-Si se distinguen dos variantes principales [44]:

- **Monocristalino (mono c-Si):** Estas células se producen utilizando el proceso Czochralski (CZ), donde el silicio fundido se cristaliza lentamente en una barra (lingote) de alta pureza cristalina. Ofrecen las eficiencias más altas en el mercado de módulos estándar, alcanzando rendimientos de laboratorio de hasta 25% y eficiencias de módulo de 20%.
- **Multicristalino (multi c-Si):** La producción es más sencilla, ya que el silicio fundido se enfría en un crisol para formar cristales columnares. Sin embargo, esta calidad de material es inferior a la monocristalina, resultando en eficiencias típicamente 2-3% más bajas. Logran eficiencias de laboratorio de 20.4% y de módulo de 17%.

2. Capas Finas (Thin Film) y sus Alternativas

Las tecnologías de capa fina (*thin film*) utilizan semiconductores directos que absorben la luz de manera muy efectiva en capas de menos de un micrómetro. Aunque tienen una menor cuota de mercado, están en crecimiento. Las tecnologías clave incluyen:

- **Silicio Amorfo (a-Si):** Deposita silicio con una estructura irregular y baja eficiencia (módulo). Un problema conocido es el efecto Staebler–Wronski, donde la potencia se degrada bajo la influencia de la

luz.

- **Teluro de Cadmio (CdTe):** Es un semiconductor compuesto con un *bandgap* cercano al óptimo teórico (1.45 eV). Los módulos alcanzan eficiencias de hasta el 11%. Presenta la desventaja de la toxicidad del cadmio y la disponibilidad limitada de materiales.
- **CIGS:** Consiste en calcopiritas (Cobre, Indio, Galio y Seleniuro) y ostenta la mayor eficiencia entre las capas finas, con módulos de hasta 15% de rendimiento. Sin embargo, su producción enfrenta desafíos de disponibilidad de materiales como el indio [44].

3. Conceptos Híbridos y de Máxima Eficiencia

Una tercera categoría busca la máxima eficiencia o combina materiales:

- **Células Híbridas (HIT):** Combinan una oblea de silicio cristalino (c-Si) con capas finas de silicio amorfo (a-Si). Estas células logran una alta eficiencia (módulo) y una mejor dependencia de la temperatura que las células c-Si normales.
- **Células Apiladas III/V:** Utilizadas para lograr la máxima eficiencia en sistemas de concentración (CPV) o aplicaciones espaciales. Estas estructuras monolíticas apiladas de semiconductores como GaAs han logrado eficiencias récord mundiales de 43.5% bajo luz solar concentrada [44]

4. Tecnologías destinadas a elevar la eficiencia

- **Buried-Contact Cells:** Una de las células de alta eficiencia más conocidas es la Célula de Contacto Enterrado, utiliza ranuras cortadas por láser en las que se insertan los contactos frontales. En la parte trasera, cuenta con una capa para formar el campo de superficie posterior (Back Surface Field o BSF). Una característica clave es que la célula está texturizada en la parte inferior (Light-Trapping), lo que refleja los rayos de luz para que viajen una distancia particularmente larga a través de la célula, mejorando la absorción.

El concepto fue comercializado bajo licencia por BP Solar (Célula Saturn), y alcanzó una eficiencia del 17.5% en un área superficial de 150 cm².

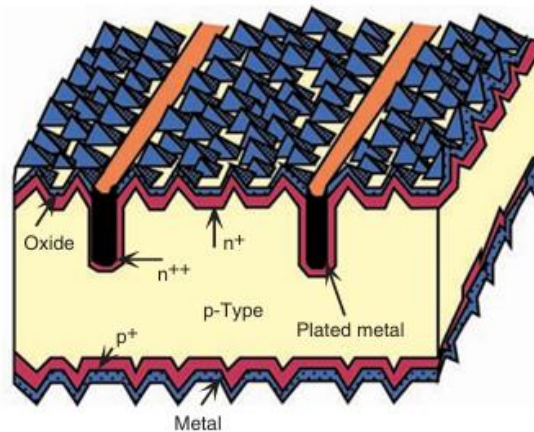


Foto 23. Buried Contact Cell. **Fuente:** [44]

- **Point-Contact Cell:** Presenta una característica notable, ambos contactos, el negativo y el positivo, se ubican en la cara posterior. Esto permite eliminar el sombreado en la parte frontal de la célula. Para que esto funcione, es esencial utilizar silicio de alta calidad con una longitud de difusión lo suficientemente larga. La cara frontal está pasivada. En la parte trasera, se utiliza una capa de óxido que se perfora con láser solo en puntos específicos para difundir un emisor local, reduciendo la recombinación superficial al mínimo.

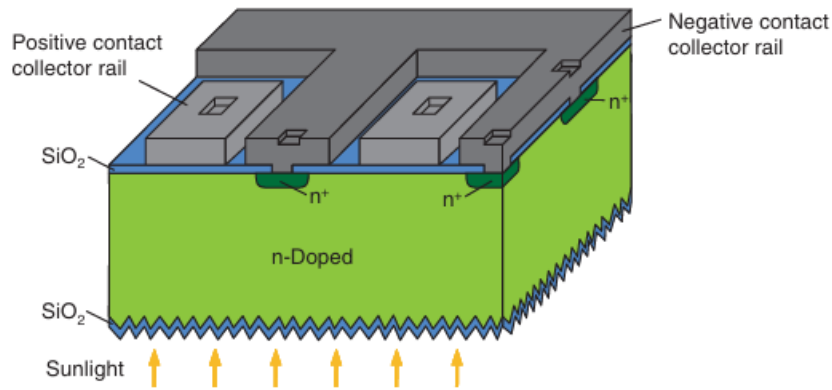


Figura 24. Point-Contact Cell. Fuente: [44]

En 1988, esta célula de laboratorio logró una eficiencia récord del 22.3%. La tecnología evolucionó y es comercializada por SunPower (A-300), alcanzando eficiencias de más del 24% en células de 150 cm².

- **PERL Cell (Passivated Emitter Rear Locally diffused):** También utiliza el principio de contactos puntuales en la parte trasera. La parte frontal está texturizada con pirámides invertidas para una captura de luz (light trapping) muy efectiva. La capa de pasivación superior es una doble capa antirreflectante (SiO₂ y Si₃N₄). La célula PERL logra una eficiencia récord del 25%.

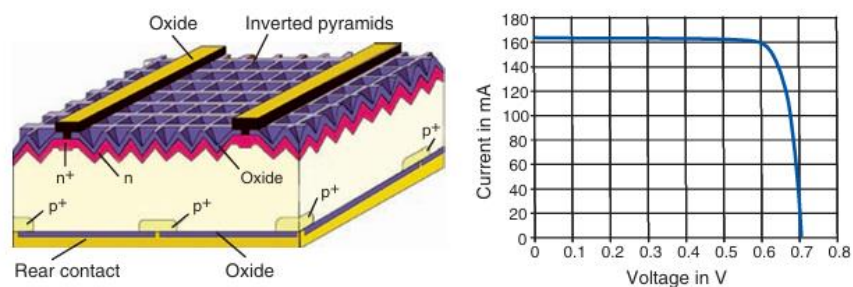


Figura 25. PERL Cell junto con la curva característica I/V. Fuente: [44]

Aunque la fabricación de esta célula récord requirió no es viable industrialmente, se producen versiones simplificadas del proceso, logrando eficiencias notables.

Cobertura de Garantía

Para la cobertura de garantía este estudio se fundamenta en la clasificación Tier 1 de BloombergNEF [45]. Esta clasificación es ampliamente reconocida como un indicador de la aceptación de los fabricantes por parte del sector financiero global. Con objeto de asegurar la calidad de los módulos y además una escala de fabricación que implique solidez operativa y capacidad de suministro, han sido valorados los 5 principales fabricantes de esta lista.

1. **JinkoSolar** (120,000 MW)
2. **Longi** (120,000 MW)
3. **Trina Solar** (100,000 MW)
4. **JA Solar** (100,000 MW)
5. **Tongwei / TW Solar** (85,000 MW)

Elegir una de estas marcas significa optar por un proveedor que posee una fuerte presencia en el mercado y está en la vanguardia de la industria, como lo demuestra su masiva capacidad de producción. Si bien BNEF advierte que su lista no es una medida de calidad técnica directa [46], el hecho de que estos módulos sean consistentemente seleccionados por múltiples entidades financieras para proyectos financiados con deuda no-recurrente (criterio Tier 1) es un fuerte indicador de su fiabilidad a largo plazo.

Metodología de la lista Tier 1 de BloombergNEF

El único factor que determina la inclusión en la lista Tier 1 es el historial de financiación de proyectos en los que se han utilizado los módulos del fabricante. Para poder entrar en esta lista un fabricante debe haber suministrado módulos de marca y fabricación propia a al menos seis proyectos diferentes, con deuda no-recurrente y financiados por al menos 6 bancos comerciales distintos [46]. Siendo evaluados durante los dos últimos años a la publicación de la lista. Como consideración, cabe mencionar que para este “Tier” sólo son tenidos en cuenta proyectos de más de 10 MW que, si bien no es el objeto del presente estudio, enfocado en instalaciones pequeñas para autoconsumo doméstico, los fabricantes de esta lista son también líderes en el sector residencial.

En cuanto a las limitaciones de esta lista, BNEF es claro, pues la clasificación es puramente una medida de aceptación de la industria por parte de los bancos, por tanto no es una lista que evalúe la calidad del producto y tampoco se presenta como una recomendación por parte de BNEF, es por ello que se recomienda una evaluación exhaustiva de la calidad del producto [46].

A pesar de que la lista Tier 1 de BloombergNEF no evalúa directamente la calidad o el desempeño del producto, sus requisitos hacen que esta lista sirva de referencia para la selección de los equipos de este trabajo.

Elección del Panel Fotovoltaico

Finalmente, tras revisar los puntos a tener en cuenta para elegir un panel fotovoltaico, se ha optado por elegir el panel JA Solar 570 W [43]. El cual destaca por varias razones. Se trata de un panel de una potencia elevada en la actualidad, esto hace que ofrezca más potencia por superficie y presenta además una alta eficiencia, siendo del 21,3%. Este módulo se ha fabricado con tecnologías para la mejora del rendimiento como Half-Cell y PERC, funcionando mejor en condiciones adversas. JA Solar se incluye dentro de las marcas Tier 1 (42) de paneles fotovoltaicos, ofreciendo una buena accesibilidad, garantía de 12 años y 25 años de rendimiento [43].

Si se compara con otros modelos del mercado, se encuentra entre las mejores opciones, aunque presenta menos potencia y eficiencia que otros como el Jinko Tiger Neo 585W, a comparación con el modelo de JA solar tiene un precio considerablemente más alto, lo que lo hace una opción menos accesible para muchos usuarios [43].

3.2.2.2 Inversor

El inversor es un componente indispensable en la tecnología de sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Se le considera la pieza central del sistema, después de los módulos solares. La tarea fundamental del inversor es convertir la corriente continua (DC) generada por los paneles fotovoltaicos en corriente alterna (AC) para poder inyectarlo en la red.

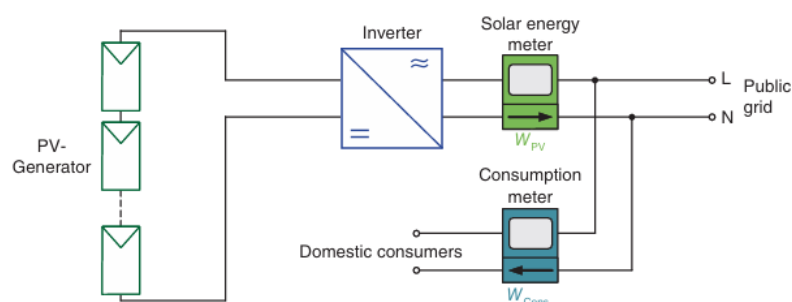


Figura 26. Conexión típica de un inversor a la red pública **Fuente:** [44]

Para su operación en un sistema conectado a la red, el inversor debe cumplir funciones esenciales que garantizan la eficiencia, seguridad y cumplimiento normativo. Estas incluyen alcanzar una alta eficiencia, sincronizarse con

la frecuencia de la red, y realizar el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPP). Además, debe monitorizar la red (frecuencia, voltaje e impedancia) para garantizar la seguridad y prevenir el funcionamiento autónomo. Finalmente, debe asegurar la seguridad del personal y facilitar la transmisión de datos de estado (potencia, corriente, voltaje y códigos de error) mediante una interfaz externa.

Para seleccionar el inversor, de igual forma que con los módulos fotovoltaicos, es importante tener en cuenta parámetros como la eficiencia del inversor, así como la cobertura de garantía del fabricante. Además el inversor debe estar dimensionado acorde a la instalación que vaya a manejar, consiguiendo de esta forma extraer la máxima potencia y garantizar un funcionamiento seguro.

Eficiencia del Inversor

La eficiencia es un parámetro clave para el rendimiento económico de la planta. Idealmente la potencia completa del generador solar debería transferirse a la red, esto es inviable debido a las pérdidas inherentes en la etapa de potencia del inversor. Estas pérdidas se deben a que los componentes reales no son ideales. La bobina genera pérdidas de calor por su resistencia óhmica, y los interruptores semiconductores añaden pérdidas por conmutación, especialmente durante el apagado.

La eficiencia de conversión η_{con} se define como la relación entre la potencia de corriente alterna en la salida P_{AC} y la potencia de corriente continua en la entrada P_{DC} .

$$\eta_{con} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

Dimensionamiento del Inversor

Para lograr un rendimiento máximo es importante conseguir un correcto dimensionamiento consiguiendo así la adaptación óptima del generador FV y el inversor. Esto implica considerar la potencia, el voltaje y la corriente.

Dimensionamiento de Potencia

Anteriormente en la década de 1990, los inversores presentaban baja eficiencia a carga parcial, esto hacía que se subdimensionaran con una relación entre la potencia del generador FV, P_{STC} y la potencia de entrada del inversor, P_{DC_N} de 1,25. Esto hacía que se limitase la potencia, perdiendo energía en condiciones de alta radiación.

Actualmente, los inversores modernos tienen un mejor comportamiento a carga parcial, haciendo que el subdimensionamiento sea innecesario. Para dimensionar un inversor se utiliza un factor de diseño, SR_{AC} que relaciona la potencia la potencia del generador FV, P_{STC} con la potencia de salida nominal del inversor, P_{AC_N} :

$$SR_{AC} = \frac{P_{STC}}{P_{AC_N}}$$

Un estudio del Instituto Fraunhofer ISE [47] sugiere un $SR_{AC} = 1,1$, en caso de utilizar valores medios horarios. Si por el contrario se usan valores medios instantáneos, de unos 10 segundos SR_{AC} no debe superar 1.

Dimensionamiento de Voltaje

El dimensionamiento de voltaje debe garantizar que el string opere dentro de los límites del inversor. Existe un límite máximo en el cual el inversor se apaga si excede el valor, evitando daños. De igual forma existe un valor mínimo que si no es alcanzado, imposibilita al inversor operar correctamente no consiguiendo los valores máximos de potencia.

Estos valores límite determinan en número máximo y mínimo de paneles por string. Para el número máximo de paneles, se considerará la situación que genere un voltaje más alto, lo que sería un día soleado con frío de invierno, en este caso los paneles poseen un voltaje de circuito abierto V_{OC} .

Asumiendo una temperatura de -10°C , el número máximo de paneles se calcula como:

$$n_{Max} = \frac{V_{Inv_Max}}{V_{OCM}(-10^{\circ}\text{C})}$$

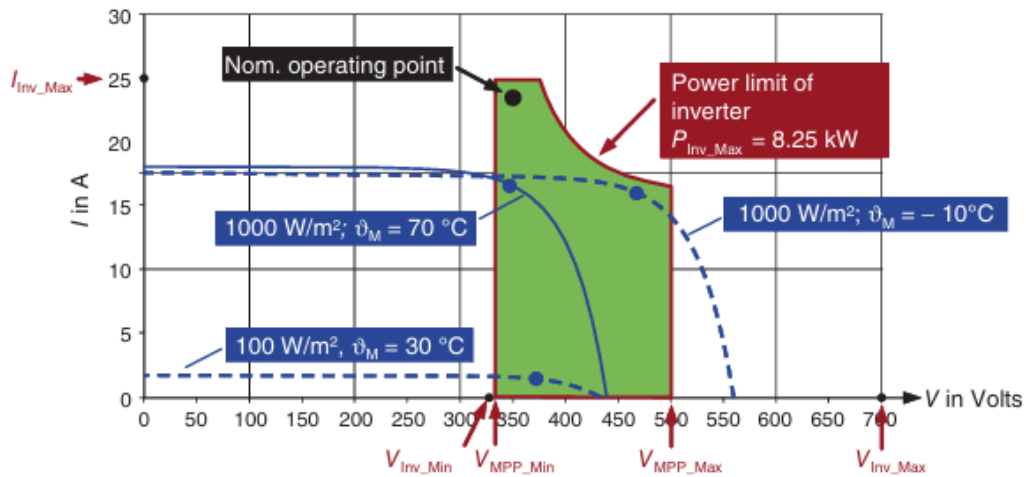


Figura 27. Región operativa de un inversor usando el inversor SMC8000TL como ejemplo **Fuente:** [44]

El número mínimo de módulos n_{Min} está determinado por la región de trabajo del MPP del inversor. Por lo tanto, consideraremos un día de verano en el que la temperatura del módulo alcance los 70°C . En este caso, el voltaje MPP del *string* no debe ser inferior a V_{MPP_Min} del inversor, ya que de lo contrario no proporcionará la máxima potencia posible o incluso podría apagarse. La ecuación es, por lo tanto:

$$n_{Min} = \frac{V_{MPP_Min}}{V_{MPP_Módulo}(70^{\circ}\text{C})}$$

Dimensionamiento de Corriente

El número de *strings* de módulos que se pueden conectar en paralelo a un inversor está limitado por la corriente máxima admisible del inversor I_{Inv_Max} y la corriente máxima del *string* I_{String_Max} .

La ecuación establece que el número de *strings* n_{String} debe ser menor o igual a la relación entre ambas corrientes:

$$n_{String} = \frac{I_{Inv_Max}}{I_{String_Max}}$$

Como medida de precaución, recomienda que la corriente máxima del *string* I_{String_Max} se calcule asumiendo un valor 1,25 veces mayor que la corriente MPP para tener en cuenta irradiancias ocasionalmente superiores a 1000 W/m^2 .

Aunque hoy en día se utilizan principalmente herramientas de simulación para el dimensionamiento, estas reglas y ecuaciones básicas siguen siendo útiles para una verificación crítica inmediata de los resultados de la simulación.

Aspectos de Seguridad

- **Puesta a Tierra:** Para la seguridad de las personas, las estructuras de soporte y los marcos de los módulos deben estar conectados a tierra, incluso en el caso de inversores. Esto es crucial debido a que los altos potenciales existentes en la capacidad entre el marco y las celdas podrían generar altos voltajes en el marco del módulo.
- **Protección contra Incendios:** Los fallos en la planta FV pueden desencadenar incendios. Un peligro crítico para los bomberos es que, incluso después de apagar el inversor, el generador solar puede mantener cientos de voltios DC. Esto subraya la necesidad de una gestión de calidad rigurosa para prevenir fallos y la urgencia de soluciones que cortocircuiten cada módulo de forma segura en caso de incendio.

Cobertura de Garantía

Al igual que con los módulos fotovoltaicos, Bloomberg elabora una lista de marcas Tier 1 de inversores. La elaboración de esta lista sigue un proceso similar a la lista de fabricantes de paneles fotovoltaicos. Algunos fabricantes mencionados en los primeros puestos de la lista son Yaskawa-Solectria, Sungrow, Siemens, Schneider Electric, Huawei, Power Electronics o ABB entre otros [48].

3.2.3 Selección de dispositivos IoT

Como ya se explicó anteriormente, según el IDAE [2], dentro del consumo eléctrico de viviendas, los usos que más energía consume es la calefacción, seguido del ACS, los electrodomésticos y la iluminación. Es por esto que los dispositivos IoT destinados al ahorro de energía, estén principalmente centrados en bajar el consumo de estos usos.

Un informe de la ACEEE (American Council for an Energy-Efficient Economy) [49] en una clasificación del uso al que están destinados los dispositivos IoT, menciona, electrodomésticos, iluminación, enchufes inteligentes, persianas inteligentes, HVAC (Calefacción, ventilación y aire acondicionado), ACS, termostatos inteligentes y sistemas de gestión de energía en el hogar.

Teniendo esta clasificación en cuenta y la literatura encontrada al respecto, en este trabajo se ha considerado una clasificación más reducida y centrada en iluminación, electrodomésticos y HVAC. Así quedan en la misma clasificación electrodomésticos, enchufes inteligentes y sistemas de gestión del hogar, esto es debido a que principalmente, los esfuerzos de reducción de la energía en este apartado están centrados en el standby que supone un 10,7% del total de la energía los electrodomésticos [2].

Por otra parte, las persianas inteligentes se han descartado del estudio debido a que los ahorros que suponen, alrededor de un 3% para iluminación y entre un 11% y un 20% para HVAC, se han considerado bajos respecto al coste de su instalación, pudiendo costar entre 300 y 500 € por ventana [49].

Finalmente, Se excluyeron los dispositivos de IoT diseñados para la reducción energética en el Agua Caliente Sanitaria (ACS) por dos motivos principales:

- **Escasez de Literatura:** Hay poca investigación o documentación existente sobre este tipo de dispositivos.
- **Bajo Impacto en el Consumo Eléctrico Nacional:** En España, solo el 18% de los sistemas de ACS utiliza electricidad como fuente de energía [2]. Dado que este estudio se enfoca en la reducción del consumo eléctrico, la inclusión de estos dispositivos no resultaría significativa.

3.2.3.1 Dispositivos IoT destinados a la iluminación

Ahorros Producidos

Los sistemas de iluminación inteligente ofrecen un potencial significativo para el ahorro de energía tanto en entornos residenciales como comerciales, principalmente a través del control de la atenuación y la reducción de las horas de funcionamiento. En los hogares, la implementación de estos sistemas puede generar un ahorro en el uso de energía de iluminación de entre el 7% y el 27%, siendo las áreas de alto uso las que pueden producir los mayores beneficios [49].

Para maximizar el ahorro, los sensores de ocupación y sistemas de control pueden ser una pieza clave, especialmente en ubicaciones donde la estancia no es continuada, como pasillos o baños. Estos ahorros se calculan de un 30% a un 80% en pasillos, entre un 30% y 90% en baños y del 45 al 80% en áreas de almacenamiento, lo que suponen ahorros bastante significativos debido al uso “de paso” que se realiza en estas áreas, por el contrario en salas donde el tiempo de ocupación es alto, como salas de descanso y salas de estudio se calculan en un 29% y un 10% respectivamente [50].

Este ahorro asociado al uso de sensores puede variar mucho en función del tiempo de retardo, es decir, el tiempo que permanece la luz encendida desde que no se detecta movimiento, registrándose ahorros del 46% con retardos de 1 minuto, 32 % para retardos de 10 minutos y 22% para 30 minutos. Aunque un periodo corto incrementa notablemente el ahorro, también está muy relacionado con la insatisfacción de los usuarios, por lo que lo más común son retrasos de entre 10 y 30 minutos [50].

Cabe destacar, que estas bombillas inteligentes, funcionan en modo de espera o standby para poder activarse a la orden del sensor. Este puede suponer una carga de menos de 0,5W por bombilla. Lo que comparado con el ahorro que pueden producir, este consumo será considerado residual [51].

Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionarán bombillas inteligentes que puedan regular la intensidad lumínica, dejando fuera aquellas que presentan iluminación RGB ya que su uso está más relacionado con el entretenimiento y no tanto con la eficiencia energética. Estos dispositivos se pueden encontrar en diversas tiendas y portales de venta, con precios variables según sean bombillas, plafones, proyectores, etc. Aunque por lo general su precio no asciende a más de 40€ la unidad.

Debido a la enorme diversidad que existe de tamaños y formas de iluminación, se han seleccionado tres ejemplos de iluminación inteligente con el que podrían contar los usuarios en sus viviendas, abarcando de esta forma un abanico de posibilidades y establecer una referencia de precios. Para bombillas se ha seleccionado un pack de dos bombillas inteligentes disponibles en IKEA [52], para focos empotrables, se han escogido un pack de 2 focos de 9W de la marca Aigostar de 128 mm de diámetro [53] y para plafones, la elección se ha basado en este plafón regulable disponible en Amazon [54].

Para los sensores de ocupación, se focalizará el uso en zonas baja ocupación como pasillos, trasteros, escaleras, baños, garajes, etc. Ya que presentan un ahorro más significativo y en zonas de alta ocupación podría llegar a ser un inconveniente para los usuarios. Para el tiempo de retardo supuesto se ha tenido en cuenta unos 10 minutos y ya que estas zonas no representan el 100% del consumo de iluminación, se hará la suposición de que estas áreas suponen un 15% del consumo de iluminación, ya que son áreas en las que los residentes invierten poco tiempo.

Los sensores de movimientos elegidos en este caso son sensores de movimiento de pared en la página EfectoLED [55], cuyo ángulo de detección es de 180°. Lo que para salas cuadriláteras representa un alcance de toda la sala, pues están pegados a la pared.

3.2.3.2 Dispositivos IoT destinados a HVAC

Por otro lado, la implementación de termostatos inteligentes para gestionar el funcionamiento de equipos de climatización (como aires acondicionados, radiadores o suelo radiante) tiene el potencial de reducir la factura eléctrica en más de un 15% según un artículo de la revista ambienta del ministerio de transición ecológica [56]. Estos dispositivos avanzados regulan de manera autónoma los sistemas de calefacción y refrigeración para mantener el nivel de confort deseado, ajustando el consumo de forma óptima según la temperatura exterior. Adicionalmente, ofrecen funcionalidades de control remoto y la capacidad de emitir notificaciones y alertas. Por ejemplo, facilitan la acción de apagar remotamente una luz olvidada o programar la calefacción para que el hogar alcance la temperatura ideal justo antes de nuestra llegada.

Otro estudio de la universidad de Dayton también respalda esa cifra, situando los ahorros producidos por termostatos WiFi inteligentes entre un 10 y un 15% [57].

Con respecto a otras tecnologías de HVAC, los ventiladores de techo inteligentes pueden ofrecer ahorros de entre un 4% y 11%. Además, los ventiladores de techo podrían sustituir a las unidades de aire acondicionado en periodos pico de la demanda, produciendo ahorros aún mayores [49]. No obstante, la gran mayoría de ventiladores inteligentes que se pueden comprar, no disponen de sensores con los que se puedan regular en función de la temperatura, o de la ocupación de la habitación, por lo que se excluyen de este estudio.

Para los termostatos inteligentes, aunque existen diferentes opciones, a precios variados, la opción elegida es el termostato inteligente de la marca Netatmo compatible con diferentes módulos de control como Google home, Alexa o Apple home [58].

3.2.3.3 Dispositivos IoT destinados a la gestión de Electrodomésticos

Los dispositivos destinados a la gestión de electrodomésticos están centrados en dos funciones.

Por un lado, aquellos cuya función es reducir el standby o carga fantasma desconectando el equipo conectado cuando no está en uso. Y por otro lado aquellos que están destinados al desplazamiento de cargas para evitar altos consumos en picos de demanda, o llevando los consumos a periodos valle.

Los enchufes, tomas y regletas inteligentes son herramientas esenciales para reducir el derroche energético en

el hogar. Su principio de funcionamiento es simple pero efectivo: interrumpen el flujo de electricidad a los aparatos conectados cuando estos no están en uso, lo que limita tanto el consumo mientras están encendidos, como la energía desperdiciada en el modo de espera (la denominada "carga fantasma"). Adicionalmente, estos dispositivos ofrecen gestión remota a través de aplicaciones, permitiendo a los usuarios encenderlos, apagarlos o programar su uso [49].

El potencial ahorro de estos dispositivos puede variar en función del alcance que tengan, mientras que enchufes "nivel 1" centrados en cortar por completo la alimentación de dispositivos una vez que estos entran en modo de suspensión logran generar ahorros de entre 16 y 20%, los dispositivos "nivel 2" que no solo manejan el modo de espera, sino que también integran detección de ocupación y la interacción del usuario, pueden generar ahorros de entre el 25% y 50%. Estos dispositivos de nivel 2, por ejemplo, pueden desconectar un sistema de entretenimiento completo si detectan inactividad prolongada, como cuando alguien se duerme con el televisor encendido. Al interrumpir tanto la energía activa como la de reserva, un modelo de Nivel 2 puede duplicar el ahorro de energía respecto a un modelo de Nivel 1 [49].

En cuanto a dispositivos cuya función se centra en desplazamiento de la carga los ahorros promedios pueden reducirse entre un 2% y un 9%. Entre estos se encuentran electrodomésticos inteligentes como lavavajillas con ahorros del 5% al 9% o lavadoras y secadoras, con ahorros del 4% al 7%.

Los dispositivos que tomaremos en este estudio se centrarán en aparatos destinados a reducir el standby, ya que es más probable que una familia promedio implemente enchufes o regletas cuyo coste es bajo, a que si ya disponen de electrodomésticos los cambien por este tipo de equipos.

Para enchufes inteligentes se seleccionarán enchufes de la marca shelly de Generación 3, cuya funcionalidad se corresponde al "nivel 1" mencionado anteriormente. Pueden ser comprados en pc componentes [59]. Y para regletas inteligentes, se han escogido regletas de la marca TP LINK, también correspondientes al "Nivel 1" descrito que puede ser encontrado en Mediamarkt. [60].

3.3 Descripción del de la metodología y formulas empleadas

La metodología para el cálculo de los ahorros en viviendas se basa en un análisis detallado de tres escenarios residenciales distintos, centrado en la modelización de curvas de carga y la cuantificación del ahorro energético y económico derivado de la implementación de energía solar fotovoltaica para autoconsumo, IoT y el efecto combinado de ambas tecnologías

3.3.1 Estimación del gasto eléctrico

El cálculo de la factura de suministro eléctrico en España se configura como un proceso multifactorial y se articula a partir de la suma de cuatro grandes bloques de costes obligatorios, definidos por el marco regulatorio del sector [61] [62]:

- Peajes de transporte y distribución
- Energía Consumida
- Carga Fiscal (Impuestos)
- Alquiler del contador

Adicionalmente, dentro de la factura eléctrica se incluyen otros cargos como la retribución a las energías renovables, cogeneración y residuos (RECORE), sobrecostes por generación en territorios fuera de la península entre otros [62].

3.3.1.1 Peajes de transporte y distribución

Los peajes constituyen el pago por la utilización de las redes de distribución y transporte de energía eléctrica y se encuentran divididos en dos términos [61]:

- **Término de potencia:** Se trata de un importe fijo en el que se establece la potencia máxima que puede consumir el usuario, expresado en €/kW [61].
- **Término de energía:** Es un importe que varía según la energía consumida, expresándose en €/kWh [61].

En el marco regulatorio actual existen 6 peajes diferentes, en los que diferencia alta o baja tensión. Para el objeto de este trabajo, nos acogeremos al Peaje 2.0 TD en el que se acogen los consumidores de baja tensión con potencias menores a 15 kW [63].

Características del suministro	Peaje T&D	Segmentos tarifarios de cargos
Baja tensión ≤ 15kW	2.0 TD	1
Baja tensión > 15kW	3.0 TD	2
Alta tensión entre 1kV y 30kV	6.1 TD	3
Alta tensión entre 30kV y 72,5kV	6.2 TD	4
Alta tensión entre 72,5kV y 145kV	6.3 TD	5
Alta tensión > 145kV	6.4 TD	6

Figura 28. Peajes de Transporte y Distribución. **Fuente:** [63]

Este peaje tiene tres tramos de discriminación horaria para el término de energía, punta, llano y valle. Para el término de potencia son dos, valle y punta.

	DE LUNES A VIERNES	FINES DE SEMANA Y FESTIVOS NACIONALES
Periodo valle	De 00:00-8:00 horas	Todo el día
Periodo llano	De 8.00 a 10.00 horas De 14.00 a 18.00 horas De 22.00 a 24.00 horas	
Periodo punta	De 10.00-14.00 horas De 18.00 a 22.00 horas	

Figura 29. Tramos horarios del término de la energía para el peaje 2.0 TD. **Fuente:** [64]

3.3.1.2 Energía Consumida

Este es el pago por la energía realmente consumida, medida en kWh por el contador. Se calcula multiplicando los precios de la oferta o producto contratado por los kWh medidos. La metodología de cálculo de este término varía drásticamente según la modalidad de contratación.

Modalidades de contratación

- **Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC):** Esta modalidad se encuentra dentro de las modalidades del mercado regulado y está disponible para puntos de suministro en baja tensión y con potencia contratada menor o igual a 10kW [61]. En este caso, el precio facturado bajo el PVPC incorpora el precio medio resultante del mercado mayorista de electricidad de contado, lo que hace que sea diferente en cada factura [61]. Los precios horarios para la facturación bajo el PVPC se publican diariamente [65].

Sin embargo, debido a la volatilidad de este modelo, se introdujo la reforma de 2024 que presenta un modelo híbrido donde el cálculo combinará precios del mercado de futuros y del mercado mayorista. A partir de enero de 2024, el cálculo se basa en un 25% del precio futuro y 75% del precio diario, con una tendencia progresiva hacia el 55% de peso del precio futuro en 2026 [66].

- **Contratación a Precio Fijo:** Los comercializadores de referencia deben ofrecer, como alternativa al PVPC, un precio fijo para el suministro durante 12 meses. Este precio es libremente fijado por la empresa e incluye los peajes, cargos, y un precio fijo en euros/kWh para el resto del coste del suministro [61].
- **Mercado Libre:** Otra opción para los consumidores es el mercado libre que, a diferencia de las opciones anteriores, los consumidores contratan el suministro con cualquier comercializador diferente al de referencia, pactando libremente el precio y las condiciones. En este caso, las empresas comercializadoras fijan el precio. Los consumidores pueden utilizar el comparador de ofertas de la CNMC para evaluar las características y el valor económico de las ofertas disponibles [61].

Estimación de la energía consumida

Para estimar la energía consumida en este estudio, nos basaremos en el informe del CIGRE sobre sistemas de referencia para la integración de recursos energéticos renovables [67], el cual nos ofrece diferentes gráficas, entre la que se encuentra un perfil promedio de consumo residencial.

Para calcular la energía consumida anual, usaremos ese perfil de consumo adaptado a la potencia consumida por cada uno de los 3 casos de este trabajo. Se obtendrá la energía consumida diaria con el área bajo la curva del perfil. Para obtener la energía anual, se tomará un año natural de 365 días.

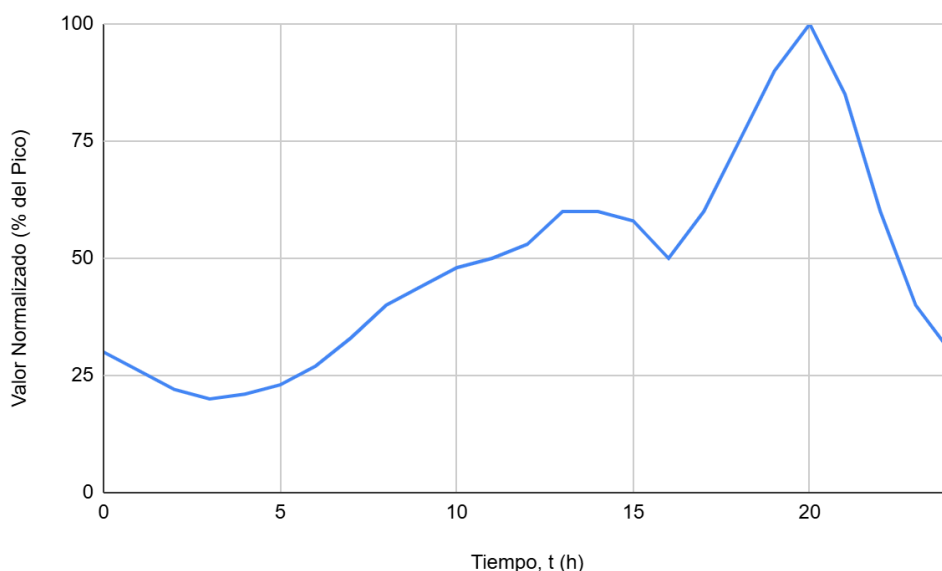


Figura 30. Curva de consumo residencial promedio. **Fuente:** [67]

3.3.1.3 Alquiler de equipos

El coste por el alquiler del contador es un importe regulado que debe incluirse obligatoriamente en el resumen de la factura. El coste asciende a 0,81 €/mes para suministros monofásicos y 1,36 €/mes para suministros trifásicos [61].

3.3.1.4 Impuestos

Sobre los costes fijos, variables, cargos y alquiler de equipos, se aplican los impuestos correspondientes. Y estos son, el Impuesto de electricidad, correspondiente al gravamen aplicado a la generación eléctrica y Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) aplicado al total facturado [61].

3.3.1.5 Mecanismo de ajuste y protección social

Además de las variables que afectan a la factura eléctrica, existen mecanismos que afectan o alteran el coste final facturado:

Tope del Gas

El "tope del gas" o mecanismo de ajuste, aprobado mediante el Real Decreto-ley 10/2022 [68] establece un límite al precio máximo del gas utilizado en las centrales de generación eléctrica con el objetivo de abaratar el precio de la luz. El coste de este mecanismo es la diferencia entre el precio de referencia del gas y el precio máximo que impone el "tope del gas" [69].

En el mercado regulado, este coste se incorpora dentro del precio de la energía. En las facturas de mercado libre, el coste aparece en el apartado de "Cargos Normativos" como "Tope precio del gas RDL 10/2022" o "Mecanismo de ajuste Op. Sistema RDL 10/2022". El importe por kWh consumido es el mismo en ambos casos. Afecta a todos los contratos con precio variable (PVPC) y a los contratos a precio fijo que no tengan coberturas de precios en el mercado o que hayan renovado o prorrogado su contrato a partir del 26 de abril de 2022 [69].

El Bono Social

El Bono Social es un mecanismo de descuento en la factura eléctrica, fijado por el Gobierno, destinado a proteger a consumidores económica o socialmente más vulnerables [61].

Los consumidores considerados "vulnerables" reciben un descuento (25% en general, aunque se han aplicado porcentajes temporales superiores) sobre todos los términos del PVPC. Para los "vulnerables severos", el descuento general es del 40%. Los consumidores "en riesgo de exclusión social" no abonan el importe de la factura [70] [61].

Para optar al Bono Social, se debe ser persona física, tener el punto de suministro en la vivienda habitual, estar acogido al PVPC (o aceptar formalizar un contrato PVPC con una comercializadora de referencia) y tener una potencia contratada igual o inferior a 10kW [61].

3.3.2 Estimación de los ahorros obtenidos

3.3.2.1 Ahorros obtenidos por la instalación solar fotovoltaica

Para estimar la energía producida por la instalación fotovoltaica, al igual que con la curva de consumo, nos basaremos en el informe del CIGRÉ sobre sistemas de referencia para la integración de recursos energéticos renovables [67]. Donde también se presenta una curva promedio de generación fotovoltaica.

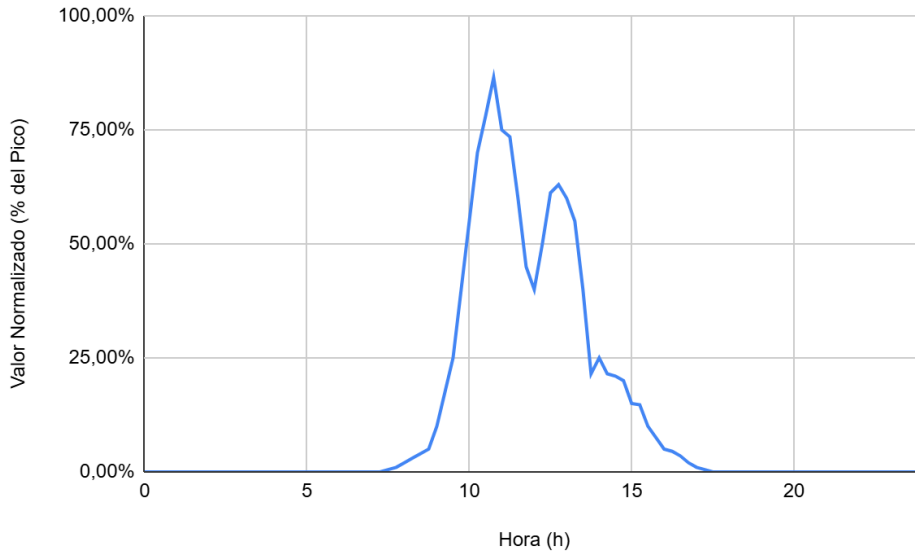


Figura 31. Curva promedio de generación fotovoltaica. **Fuente:** [67]

Esta curva, es ligeramente diferente a la curva de generación fotovoltaica que acostumbramos a ver, pues lejos de ser ideal, es normal que se presenten este tipo de irregularidades. Al estar en un entorno urbano es posible que haya edificios cerca que puedan producir sombras en los paneles en ciertos momentos del día, o incluso días nublados que puedan producir el mismo efecto.

Tomando esa curva como referencia, ajustará cada curva a la potencia instalada de cada caso.

El nuevo coste de consumo para los usuarios será la diferencia entre la curva de consumo de cada consumidor y la curva de generación fotovoltaica. De forma genérica:

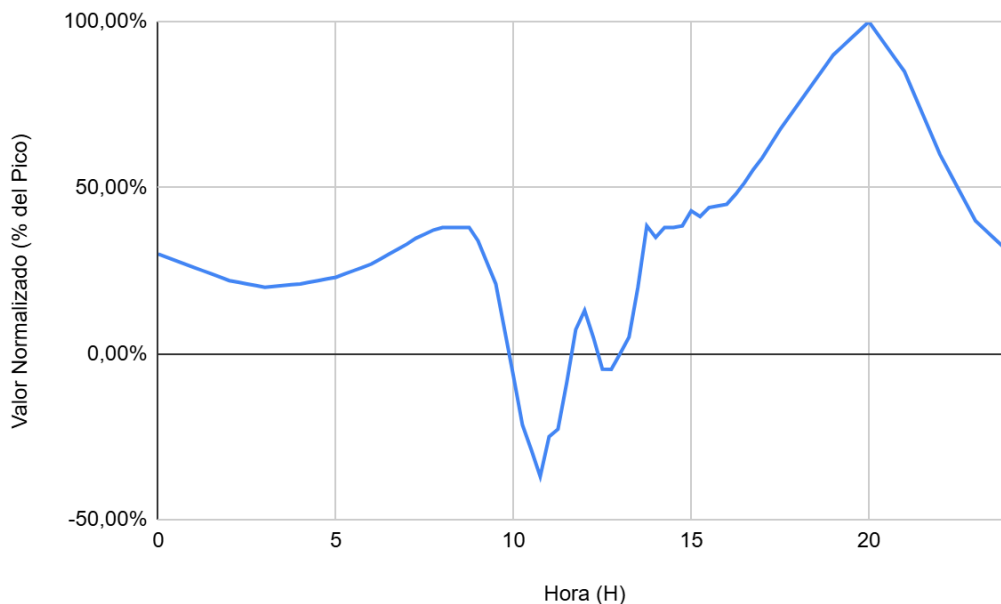


Figura 32. Diferencia entre consumo y generación FV. **Fuente:** Elaboración propia basado en: [67].

Sin embargo, la instalación fotovoltaica, en algunos momentos del día, está generando excedentes, es decir, la generación supera al consumo. Esta energía, en caso de que no se cuente con una batería física donde se pueda almacenar la energía o de un acuerdo con la distribuidora que ofrezca una batería virtual que reparta estos excedentes, esa energía se vierte a la red desaprovechando esa energía. En el presente estudio, el objetivo es comprobar si las instalaciones fotovoltaicas son rentables o no por sí mismas, por lo que baterías tanto virtuales como físicas no serán consideradas.

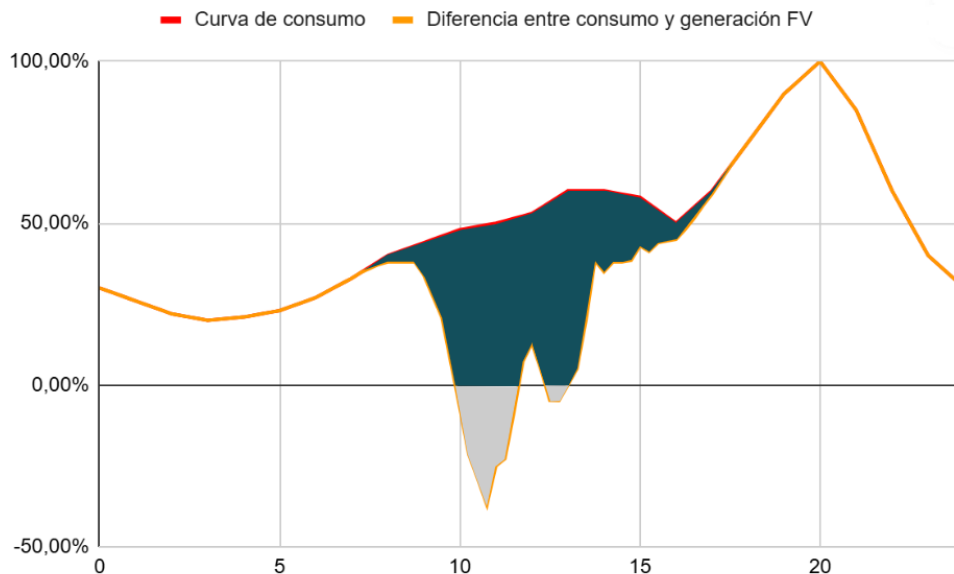


Figura 33. Comparativa entre curva de consumo antes y después de instalación FV. **Fuente:** Elaboración propia basado en: [67].

En la Figura 33, podemos observar en el área azul, los ahorros que produce la instalación FV. Las áreas grises serían los excedentes de la instalación que podrían ser aprovechados como se ha explicado en el párrafo anterior.

En este caso, consideraremos que no se aprovecha los excedentes, por lo que, para calcular la energía ahorrada, habría que cuantificar el área verde. Sin embargo, toda la energía no pertenece al mismo tramo de facturación. Para calcular el nuevo coste de la energía consumida, se tendrá en cuenta la energía total consumida, teniendo en cuenta el aporte de la instalación fotovoltaica, y en este nuevo caso, sin tener en cuenta los excedentes

3.3.2.2 Cuantificación del Ahorro por Dispositivos IoT

Los dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) considerados en este estudio (termostatos inteligentes, sistemas de iluminación automática, gestión de electrodomésticos, etc.) se enfocan en la reducción de cargas específicas. La cuantificación del ahorro por la implementación de IoT se modela como un porcentaje de reducción estimado aplicado a las secciones relevantes de la curva de consumo inicial. Este porcentaje se determina a partir de datos de eficiencia o estudios de caso para cada tipo de dispositivo, lo que permite cuantificar la energía ahorrada por esta tecnología en cada caso.

Para el cálculo del porcentaje que consiguen ahorrar estos dispositivos, se multiplican los porcentajes de ahorro de cada dispositivo con el peso de los equipos que estos dispositivos están destinados a optimizar. En este caso, para dispositivos específicos aplicados a la iluminación, los equipos de clima (HVAC) y la reducción del consumo en modo standby.

$$\begin{aligned} \%Ahorro_{IoT} = & (\%Ahorro_{IoT(Ilum)} \times \%Uso\ Eléctrico(Ilum) \\ & + \%Ahorro_{IoT(HVAC)} \times \%Uso\ Eléctrico(HVAC) \\ & + \%Ahorro_{IoT(Standby)} \times \%Uso\ Eléctrico(Standby))/100 \end{aligned}$$

3.3.2.3 Ahorros de la combinación de las tecnologías

El paso final integra y cuantifica el beneficio económico de la implementación conjunta de la generación renovable y la tecnología IoT.

El análisis de la combinación de tecnologías toma en cuenta la suma de los dos componentes de ahorro energético calculados previamente: el ahorro generado por la instalación fotovoltaica y el ahorro derivado de los dispositivos IoT.

Adicionalmente, esta metodología incluye los ahorros indirectos que generan los dispositivos IoT destinados a la monitorización y control de la propia instalación de autoconsumo. Estos ahorros indirectos (por ejemplo, los que optimizan la gestión de excedentes o el uso de la energía generada) se basan en datos y estudios previos de los dispositivos seleccionados para obtener una representación más realista de la tecnología empleada. La curva

de consumo actual en este escenario se corresponde con la curva de consumo ya optimizada por los dispositivos IoT, sobre la cual se aplica la curva de generación fotovoltaica.

3.3.3 Cálculos empleados

Existen diferentes formas para evaluar económicamente los beneficios producidos al realizar una inversión. Estas herramientas buscan determinar la rentabilidad financiera del capital invertido, es decir, las utilidades que se consiguen al realizar una inversión específica en un proyecto. En esencia, el análisis de rentabilidad consiste en establecer la relación entre las utilidades obtenidas y el capital invertido [71].

3.3.3.1 Criterios de Evaluación Reconocidos

Organismos internacionales han propuesto varios criterios de rentabilidad comercial para la evaluación de proyectos, como los propuestos por la ONU en el manual para la preparación de estudios de viabilidad industrial de 1978 [72].

- El cálculo del valor neto actual (o Valor Presente Neto, **VAN**).
- La tasa interna de rendimiento (**TIR**).
- El retorno de inversión (o periodo de reembolso/recuperación **ROI**).
- La tasa sencilla de rendimiento.
- El análisis de umbral de rentabilidad.
- El análisis de sensibilidad.

O los propuestos por el Centro de Desarrollo de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo de 1974 con sede en París

- El cálculo del valor neto actual (o Valor Presente Neto, **VAN**).
- La tasa interna de rendimiento (**TIR**).
- El retorno de inversión (o periodo de reembolso/recuperación **ROI**).
- Los criterios de rentabilidad derivados del análisis contable.

Dentro del ambiente empresarial, dos de estos métodos destacan por ser los más utilizados en la actualidad: el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y el método de la Tasa Interna de Rendimiento (TIR). Siendo esta razón por la que tomaremos estos métodos para evaluar la rentabilidad en el presente estudio.

3.3.3.2 Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN), también conocido por sus siglas en inglés NPV (Net Present Value), representa el incremento esperado en la riqueza de los inversionistas al llevar a cabo un proyecto. Este método se fundamenta en actualizar al momento actual la diferencia entre todos los ingresos y gastos de efectivo proyectados a lo largo de la vida útil del proyecto [71].

Definición y Fórmula

El VAN se define matemáticamente como la suma del valor presente de los flujos de efectivo netos, restando la inversión inicial. Si definimos I_j como los ingresos o entradas de efectivo en el periodo j , E_j como los egresos o salidas en el mismo periodo, e InI como la inversión inicial (desembolso inicial), a una tasa de interés o actualización fija i , la fórmula se expresa como:

$$VAN = -InI + \frac{(I_1 - E_1)}{(1 + i)^1} + \frac{(I_2 - E_2)}{(1 + i)^2} + \dots + \frac{(I_n - E_n)}{(1 + i)^n}$$

O de forma simplificada:

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{(I_j - E_j)}{(1 + i)^j} - InI$$

La inversión inicial InI se realiza en el periodo cero, y todos los flujos de efectivo subsiguientes $(I_j - E_j)$ se traen al presente utilizando la tasa de actualización i

Criterio de Decisión y Limitaciones

La tasa de actualización (i) utilizada en el cálculo debe reflejar el costo de oportunidad del capital, es decir, el rendimiento que podría obtenerse invirtiendo la misma cantidad en un proyecto alternativo de riesgo similar, o la tasa mínima de rendimiento requerida por el inversionista.

Una vez calculado el VAN, el criterio de decisión es el siguiente:

- **Si el VAN es positivo ($VAN > 0$):** La rentabilidad de la inversión supera la tasa de actualización. El proyecto es aceptable.
- **Si el VAN es cero ($VAN = 0$):** La rentabilidad es igual a la tasa de actualización. El proyecto es aceptable.
- **Si el VAN es negativo ($VAN < 0$):** La rentabilidad es inferior a la tasa de actualización. El proyecto debe ser descartado.

En caso de tener que seleccionar entre varios proyectos, se optará por aquel que genere el mayor VAN. Una debilidad importante de este método es la dificultad para determinar con precisión una tasa de actualización apropiada, además de no indicar la tasa de rentabilidad exacta del proyecto. [71]

Para el cálculo del VAN se considerarán los siguientes flujos:

- **Inversión Inicial (Gasto):** Comprenderá el costo total de la adquisición e instalación de los paneles solares, los inversores, los dispositivos IoT (sensores, medidores inteligentes, plataforma de gestión, etc.), y los gastos asociados a la mano de obra y trámites.
- **Flujos Positivos (Ingresos):** Estarán representados principalmente por el ahorro en la factura eléctrica debido al autoconsumo (energía que se deja de comprar a la red) y la posible compensación o venta de excedentes de energía a la red. Adicionalmente, se incluirán los ahorros energéticos indirectos generados por la **optimización del consumo** facilitada por los **dispositivos IoT** y la gestión inteligente.
- **Flujos Negativos (Gastos Operacionales):** Se incluirán por ejemplo los costos de mantenimiento periódico de la instalación FV.

3.3.3.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)

El método de la Tasa Interna de Retorno (TIR), a veces denominado Costo de Capital, es un criterio fundamental para evaluar proyectos, ajustando la tasa de descuento al riesgo inherente de la inversión. La TIR representa la tasa de descuento a la cual el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto es igual a cero. En otras palabras, es la tasa que iguala el valor actual de los ingresos de efectivo con el valor actual de los egresos de efectivo (la inversión). Esta tasa refleja la rentabilidad exacta que el proyecto ofrece [71].

Definición Matemática y Objetivo

El cálculo de la TIR busca encontrar la tasa de interés (i) que satisface la siguiente ecuación, donde el VAN es igual a cero:

$$0 = -InI + \frac{(I_1 - E_1)}{(1+i)^1} + \frac{(I_2 - E_2)}{(1+i)^2} + \dots + \frac{(I_n - E_n)}{(1+i)^n}$$

De manera equivalente, la TIR es la tasa que iguala la Inversión Inicial (InI) al valor presente de los flujos de efectivo netos futuros.

$$InI = + \frac{(I_1 - E_1)}{(1+i)^1} + \frac{(I_2 - E_2)}{(1+i)^2} + \dots + \frac{(I_n - E_n)}{(1+i)^n}$$

O de forma simplificada:

$$InI = \sum_{j=1}^n \frac{(I_j - E_j)}{(1+i)^j}$$

- Si $TIR > \text{Costo de Capital}$: El proyecto es rentable y debe aceptarse, ya que genera un rendimiento superior al costo de los fondos.
- Si $TIR < \text{Costo de Capital}$: El proyecto debe descartarse.
- Si $TIR = \text{Costo de Capital}$: El proyecto es indiferente.

En la práctica, la TIR se calcula fácilmente con software financiero, lo que proporciona una solución más exacta que la interpolación manual

4 ANÁLISIS DE LOS CASOS SIMULADOS

En este capítulo se aplica la metodología de cálculo a los tres perfiles de consumo definidos. Se establece un estudio base del consumo sin optimización, detallando la composición de la factura eléctrica (peajes, energía, impuestos y alquiler de equipos). Posteriormente, se analiza la rentabilidad de la instalación fotovoltaica de forma individual, incluyendo su dimensionamiento y la cuantificación de los ahorros sin aprovechamiento de excedentes. A continuación, se evalúa el ahorro y la viabilidad económica de la implementación de dispositivos IoT (iluminación, HVAC y standby). Finalmente, se presenta un análisis de la combinación de ambas tecnologías y se concluye con una discusión detallada de los resultados financieros obtenidos en cada escenario.

4.1 Estudio del consumo de viviendas sin implantación de generación renovable ni dispositivos IoT

En cuanto al estudio del consumo de las viviendas, se analizarán cada uno de los tres casos, conforme a lo ya explicado antes respecto a la factura eléctrica.

4.1.1 Coste de peaje de transporte y distribución

4.1.1.1 Término de potencia

Para el cálculo del término de potencia, tomaremos los datos del informe de precios energéticos regulados de gas y electricidad con datos de octubre 2025 [73]. Aunque los precios varían según se escoja un modelo de tarifa u otro, PVPC, precio fijo o mercado libre, se ha optado por elegir el PVPC ya que los datos son más estables. En el caso del mercado libre, los precios varían ligeramente según la compañía.

En este caso, a octubre de 2025, el término de potencia se establece en el periodo de punta a 1,913244 €/kW/mes, con cargos de 0,330968 €/kW/mes y en el periodo de llano de 0,036847 €/kW/mes, con cargos de 0,021285 €/kW/mes. De esta forma, el coste mensual por la potencia contratada se calcularía con la siguiente ecuación.

$$C_{TP} = P_{Cont} \cdot (TP_{Punta} + Cargos_{Punta}) + P_{Cont} \cdot (TP_{Valle} + Cargos_{Llano})$$

Teniendo esto en cuenta, el coste por el término de potencia acogiéndose al PVPC, suponiendo que la potencia contratada es igual en ambos tramos, en cada caso será el siguiente:

- **Caso consumidor 3,5 kW:**

$$C_{TP1} = 3,5 \cdot (1,913244 + 0,330968) + 3,5 \cdot (0,036847 + 0,021285) = 8,058 \text{ €/mes}$$

- **Caso consumidor 5 kW:**

$$C_{TP2} = 5 \cdot (1,913244 + 0,330968) + 5 \cdot (0,036847 + 0,021285) = 11,512 \text{ €/mes}$$

- **Caso consumidor 7,5 kW:**

$$C_{TP2} = 7,5 \cdot (1,913244 + 0,330968) + 7,5 \cdot (0,036847 + 0,021285) = 17,268 \text{ €/mes}$$

4.1.1.2 Facturación del término de energía

En cuanto al término de energía, al igual que con el término de potencia también se toman los datos del informe de precios energéticos regulados de gas y electricidad con datos de octubre 2025 [73]. En este caso, como ya se explicó anteriormente (48), la tarifa 2.0 TD establece tres tramos horarios, a diferencia del término de potencia que establece dos, estos tres tramos son punta, llano y valle.

El coste que establece el PVPC a octubre de 2025 en el periodo de punta a 0,034234 €/kWh/mes, con cargos de 0,058305 €/kWh/mes, en el periodo de llano a 0,016540 €/kWh/mes, con cargos de 0,011661 €/kWh/mes y en el periodo de valle a 0,000079 €/kWh/mes, con cargos de 0,002915 €/kWh/mes.

Este precio es igual para cada consumidor, independientemente de su potencia contratada, y dependerá del consumo eléctrico realizado por cada usuario en la periodicidad en la que se facture su tarifa.

4.1.2 Coste del consumo eléctrico

Usando la curva de consumo promedio del CIGRÉ [67], y teniendo en cuenta los tramos horarios del término de la energía, se calculará el área bajo la curva de la gráfica de cada consumidor y se multiplicará por el término de energía del periodo correspondiente.

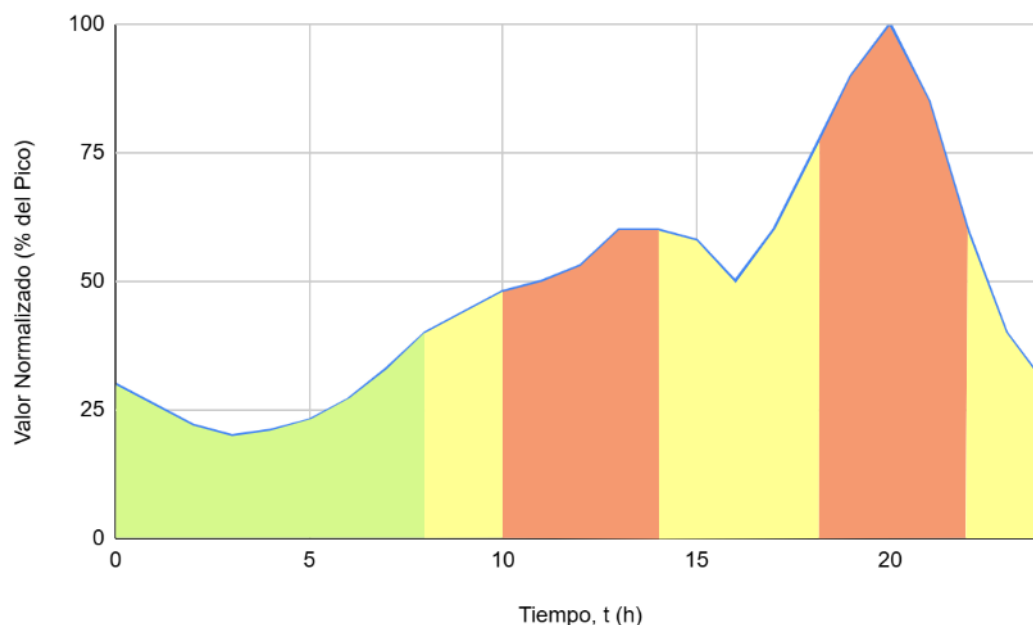


Figura 34. Curva de consumo promedio del peaje 2.0TD con discriminación horaria. **Fuente:** Elaboración propia basado en [67] y [64].

- **Caso consumidor 3,5 kW:** El consumidor de potencia pico contratada 3,5 kW, presenta la siguiente curva de consumo, de acuerdo con [67].

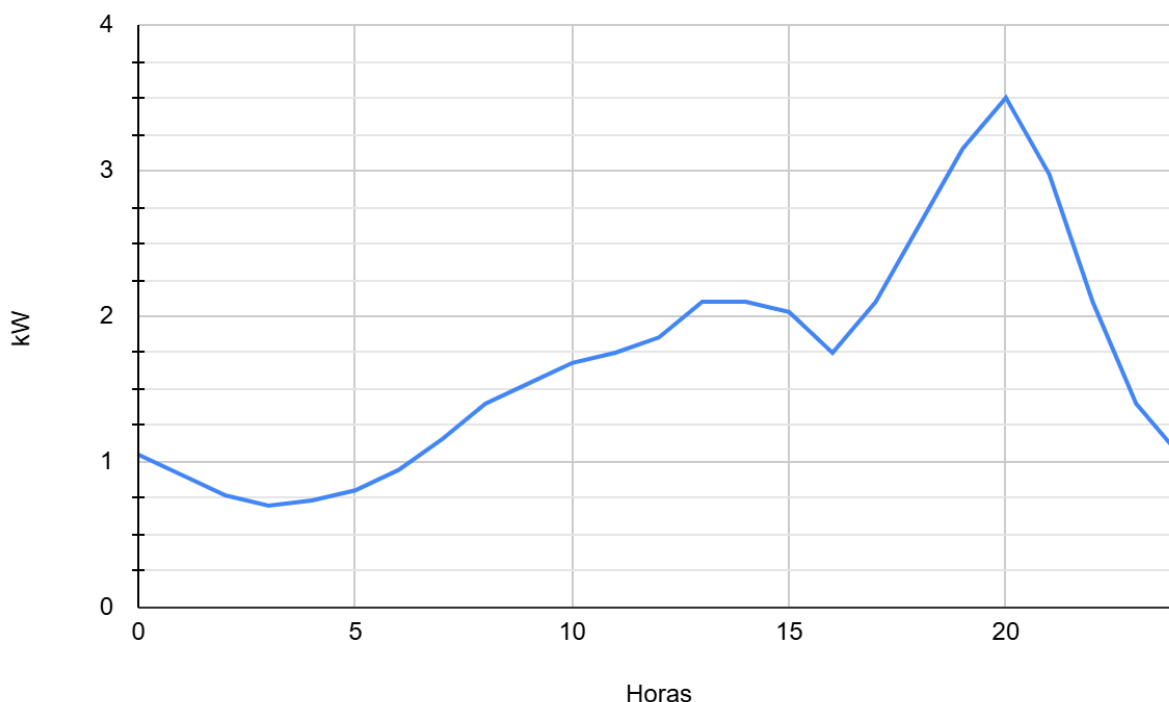


Figura 35. Curva de consumo con potencia pico 3,5 kW. **Fuente:** Elaboración propia basado en [67].

Lo que nos da un consumo diario de 41,125 kWh, los cuales se dividen en 19,583 kWh para el periodo de punta, 14,298 kWh para el periodo de llano y 7,245 kWh para el periodo de valle. Esta división está hecha para días laborables, ya que como indica el peaje 2.0TD, fines de semana y festivos será completamente periodo de valle.

Para calcular el coste, se aplica la ecuación multiplicando los consumos por los términos de energía más cargos. Sin embargo, los consumos obtenidos anteriormente se corresponden a consumos diarios, para obtener los consumos mensuales, se consideran meses de 30 días. Por lo que este consumidor presentaría un consumo mensual de 1233,75 kWh, obtenidos multiplicando el consumo diario por 30, de igual forma para los 3 periodos, siendo los consumos para punta, llano y valle de 587,48 kWh, 428,93 kWh y 217,35 kWh respectivamente. Por lo que su coste de consumo sería:

$$C_{ECons1(L)}' = 587,48 \cdot (0,034234 + 0,058305) + 428,93 \cdot (0,016540 + 0,011661) + 217,35 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 67,11 \text{ €/mes}$$

Este precio, sin embargo, tiene que ser ajustado, pues está calculado sin tener en cuenta los fines de semana. Para incluir el coste de los fines de semana, para simplificar los cálculos, se toma toda la energía mensual como periodo de valle y se considera la parte proporcional del coste calculado anteriormente y el coste calculado para los fines de semana, en este caso 5/7 y 2/7 respectivamente, siendo la fracción semanal que cada uno representa.

$$C_{ECons1(FDS)}' = 1233,75 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 3,694 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons1} = C_{ECons1(L)}' \cdot \frac{5}{7} + C_{ECons1(FDS)}' \cdot \frac{2}{7} = 48,99 \text{ €/mes}$$

Obteniéndose así el coste de la energía consumida. En este cálculo, no se han considerado los festivos, por lo que podría variar ligeramente el coste final, no obstante, para acortar los cálculos y debido a que la variación es menor, se ha optado por no incluir los días festivos.

- **Caso consumidor 5 kW:** El consumidor de potencia pico contratada de 5 kW, presenta la siguiente curva de consumo, de acuerdo con [67].

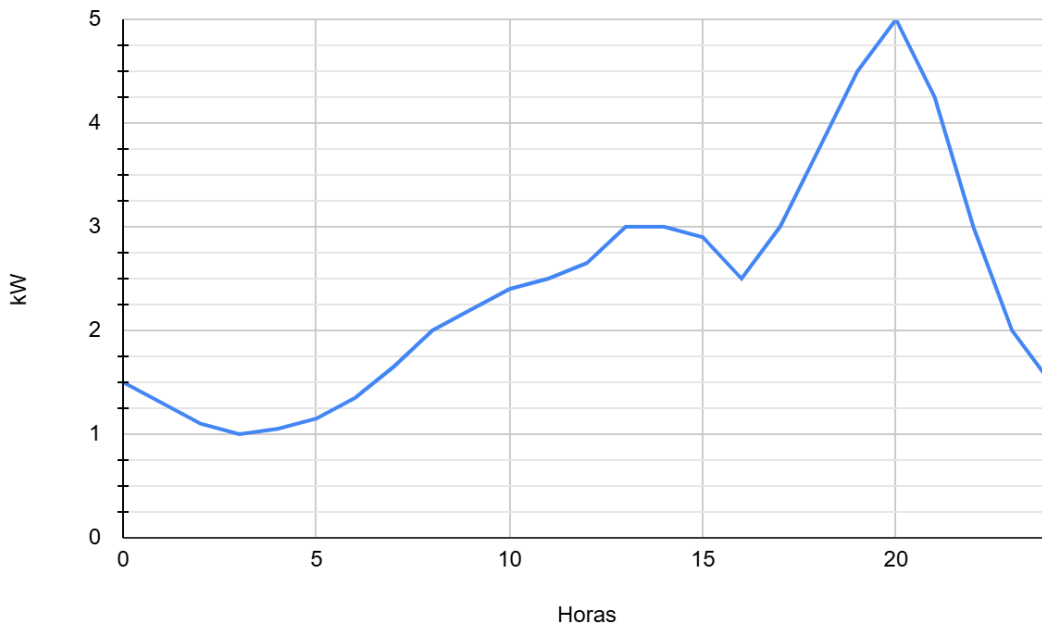


Figura 36. Curva de consumo con potencia pico 5 kW. **Fuente:** Elaboración propia basado en [67].

En este caso el consumo total diario es de 58,75 kWh, divididos para días laborables en 27,975 kWh para el tramo de punta, 20,425 kWh para el tramo de llano y 10,35 kWh para el tramo de valle. Y en cuanto al consumo mensual se obtienen 1762,5 kWh. Repitiendo los cálculos realizados en el caso anterior:

$$C_{ECons2(L)}' = 839,25 \cdot (0,034234 + 0,058305) + 612,75 \cdot (0,016540 + 0,011661) + 310,5 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 95,87 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3(FDS)}' = 1762,5 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 5,277 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons2} = C_{ECons2(L)}' \cdot \frac{5}{7} + C_{ECons2(FDS)}' \cdot \frac{2}{7} = 69,99 \text{ €/mes}$$

- **Caso consumidor 7,5 kW:** El consumidor de potencia pico contratada de 7,5 kW, presenta la siguiente curva de consumo, de acuerdo con [67].

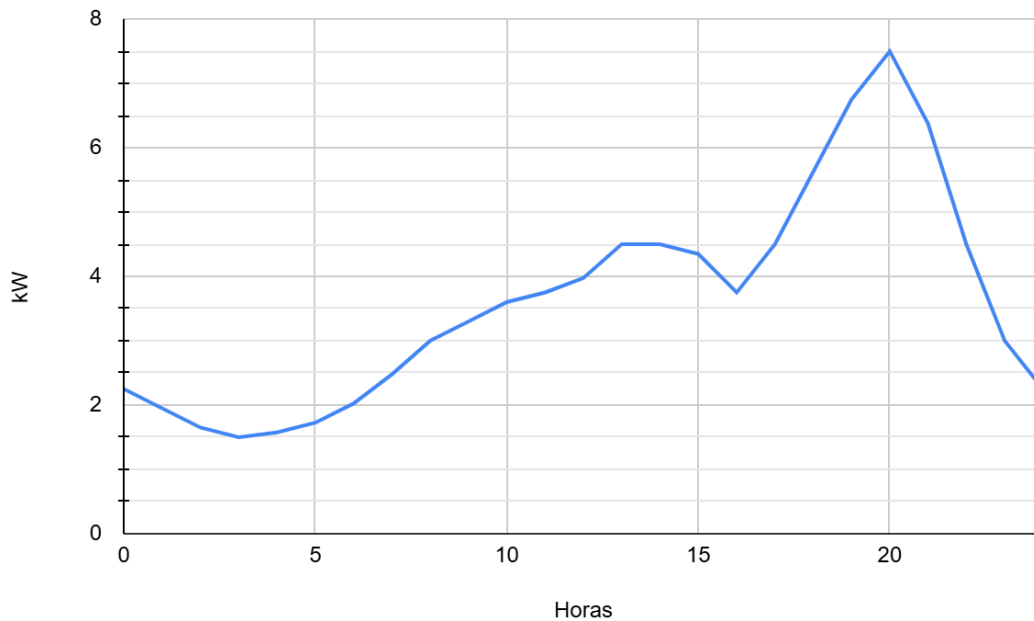


Figura 37. Curva de consumo con potencia pico 7,5 kW. **Fuente:** Elaboración propia basado en [67].

En este caso el consumo total diario es de 88,125 kWh, divididos para días laborables en 41,963 kWh para el tramo de punta, 30,638 kWh para el tramo de llano y 15,525 kWh para el tramo de valle. Y en cuanto al consumo mensual se obtienen 2643,75 kWh. Repitiendo los cálculos realizados en el caso anterior:

$$C_{ECons3(L)}' = 1258,88 \cdot (0,034234 + 0,058305) + 919,13 \cdot (0,016540 + 0,011661) + 465,75 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 143,81 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3(FDS)}' = 1233,75 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 7,915 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3} = C_{ECons3(L)}' \cdot \frac{5}{7} + C_{ECons3(FDS)}' \cdot \frac{2}{7} = 104,98 \text{ €/mes}$$

4.1.3 Coste alquiler de equipos

Como ya se explicó anteriormente en el punto de coste de alquiler de equipos, para los casos de los consumidores de con potencia pico de 3,5 kW y 5 kW, al tener un suministro monofásico, tendrán un coste por alquiler de contador de 0,81 €/mes. Para el consumidor de 7,5 kW, dado que su suministro es trifásico, su coste por alquiler de equipos será de 1,36 €/mes [61].

4.1.4 Impuestos

4.1.4.1 Impuesto especial sobre la electricidad

El impuesto sobre la electricidad está establecido en un 5,11269632% [74]. El cual se aplica por igual a todos los casos ya que suponemos que ninguno tiene ningún tipo de reducción como podría ser el bono social.

En ese caso el importe a pagar por este impuesto sería el siguiente:

- **Caso consumidor 3,5 kW:** Aplicando el porcentaje al primer caso, se obtiene un importe mensual de 2,98 €/mes para el impuesto sobre la electricidad.
- **Caso consumidor 5 kW:** Al igual que con el caso anterior, para este caso, el consumidor de 5 kW, abonaría la cantidad de 4,21 €/mes.
- **Caso consumidor 7,5 kW:** Finalmente, para este caso, la cantidad a pagar por el impuesto a la electricidad sería de 6,32 €/mes.

4.1.4.2 Impuesto sobre el valor añadido (IVA)

El impuesto sobre el valor añadido a partir del 1 de enero de 2025, volvió a establecerse en el 21% sobre el total de la factura, por lo que por este motivo la cantidad a pagar por cada consumidor sería de 12,87 €/mes, 18,17 €/mes y 27,29 €/mes, para el consumidor de 3,5 kW pico, 5 kW pico y 7,5 kW pico, respectivamente.

4.1.5 Factura Total y gasto anual

A continuación, se presenta la tabla con los resultados, teniendo en cuenta todos los campos descritos. Cabe destacar que no han sido considerados mecanismos de ajuste como el tope del gas o el bono social para usuarios vulnerables.

Potencia pico contratada (kW)	3,5	5	7,5
Coste término de potencia	8,51 €	11,51 €	17,27 €
Coste energía consumida	48,99 €	69,99 €	104,98 €
Alquiler de equipos	0,81 €	0,81 €	1,36 €
TOTAL SIN IMPUESTOS	58,31 €	82,31 €	123,61 €
Impuesto especial sobre la electricidad	2,98 €	4,21 €	6,32 €
Impuesto sobre el valor añadido (IVA)	12,87 €	18,17 €	27,29 €
TOTAL	74,16 €	104,69 €	157,22 €

Tabla 1. Facturación eléctrica para cada consumidor sin la implantación de tecnologías para el ahorro energético.

Teniendo en cuenta los costes mensuales el coste anual de cada consumidor sería de 889,91 €, 1256,25€ y 1886,59 € respectivamente.

4.2 Estudio del ahorro de viviendas con implantación de generación renovable

4.2.1 Dimensionamiento de la instalación fotovoltaica

4.2.1.1 Dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos

Para calcular el número de paneles fotovoltaicos,

$$N_{\text{paneles}} = \frac{\text{Potencia}_{\text{PicoVivienda}}}{\text{Potencia}_{\text{PicoPanel}}}$$

- **Caso consumidor 3,5 kW:**

$$N_{\text{paneles1}} = \frac{3500}{585} = 5,98 \approx 6 \text{ paneles}$$

- **Caso consumidor 5 kW:**

$$N_{\text{paneles1}} = \frac{5000}{585} = 8,55 \approx 9 \text{ paneles}$$

- **Caso consumidor 7,5 kW:**

$$N_{\text{paneles1}} = \frac{7500}{585} = 12,82 \approx 13 \text{ paneles}$$

4.2.1.2 Dimensionamiento y elección del Inversor

Para dimensionar el inversor, primero será necesario calcular la potencia de cada instalación multiplicando el número de paneles por su potencia pico. Usando valores instantáneos la potencia de los paneles no será superior a la potencia del inversor [47].

$$SR_{AC} = \frac{P_{STC}}{P_{AC_N}} \leq 1$$

Por lo que para cada instalación el inversor tendrá una potencia de:

- **Caso consumidor 3,5 kW:**

$$P_{Inst1} = 585 \times 6 = 3,510 \text{ kW}$$

$$P_{Inv1} \geq P_{Inst1} = 3,510 \text{ kW}$$

- **Caso consumidor 5 kW:**

$$P_{Inst2} = 585 \times 9 = 5,265 \text{ kW}$$

$$P_{Inv2} \geq P_{Inst2} = 5,265 \text{ kW}$$

- **Caso consumidor 7,5 kW:**

$$P_{Inst3} = 585 \times 13 = 7,605 \text{ kW}$$

$$P_{Inv3} \geq P_{Inst3} = 7,605 \text{ kW}$$

Una vez obtenida la potencia estimada para cada inversor, se elige aquel que cumpla con esa potencia y con los criterios explicados en la metodología. En este caso, para las tres instalaciones se han seleccionado inversores Huawei.

Tanto para la primera como para la segunda instalación, se han seleccionado un inversor SUN2000 de la serie LBO, siendo el SUN2000-3.68K-LBO para la primera y el inversor SUN2000-5K-LBO para la segunda [75]. Esta serie de inversores están diseñados para instalaciones monofásicas de hasta 6 kW, siendo además un inversor de alta eficiencia y cuyo fabricante, se encuentra de la lista Tier 1.

En el caso del tercer consumidor, al tener una potencia mayor y al ser su instalación trifásica, se ha optado por el inversor SUN2000-8KTL-M1 [76]. Esta serie está pensada para instalaciones trifásicas de baja potencia como la de este consumidor. También son inversores de alta eficiencia y al ser Huawei como ya se mencionó, el fabricante se encuentra en la lista Tier 1.

4.2.1.3 Distribución de los paneles

Para saber cómo se van a colocar los paneles, es necesario ver cuántos paneles se pondrán por string y comprobar que la instalación es viable. Para ello, en primer lugar, se debe comprobar que el número máximo de paneles en un string, no supera el voltaje máximo del inversor [47].

$$n_{max} = \frac{V_{Inv_Max}}{VOC_Modulo(Temperatura\ más\ baja)(-10^{\circ}C)}$$

- **n_{max}** : Es el número máximo de módulos que pueden conectarse en serie en una cadena (string).
- **V_{Inv_Max}** : Es la tensión máxima de entrada admisible del inversor. Si se excede este valor, el inversor se apagará o podría dañarse.
- **VOC_Modulo** : Es la tensión de circuito abierto de un solo módulo a la temperatura más baja esperada (el ejemplo asume). Se utiliza la temperatura más baja porque la tensión de las células de silicio aumenta a medida que baja la temperatura.

Además de comprobar el número de paneles máximo por string, es fundamental que el inversor opere en un voltaje mínimo. Esa condición se da cuando el voltaje mínimo que pueden producir los paneles de un string, supera el voltaje de operación del inversor [47].

$$n_{min} = \frac{VMPP_mininv}{VMppmodulo(Temperatura\ más\ alta)}$$

- **n_{min}** : Es el número mínimo de módulos necesarios en serie para que el inversor funcione correctamente.
- **$VMPP_mininv$** : Es la tensión mínima del rango de seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPP) del inversor. Si la tensión del string cae por debajo de este umbral, el inversor no podrá extraer la máxima potencia posible.
- **$VMppmodulo$** : Es la tensión en el punto de máxima potencia del módulo a la temperatura de operación más alta esperada (el ejemplo asume). Se utiliza la temperatura más alta porque la tensión de los módulos disminuye al calentarse.

- **Caso consumidor 3,5 kW:**

$$n_{max} = \frac{600}{55,744} = 10,76 \approx 10\ paneles$$

$$n_{min} = \frac{40}{36,76} = 1,01 \approx 2\ paneles$$

En el caso de número máximo, habría que redondear a la baja, pues pasarnos de 10,76 ya causaría problemas al inversor. Por el contrario, con el número mínimo al alza, pues necesitamos superar 1,01 paneles, por lo que no podríamos poner 1 panel. Sabiendo que el número de paneles en la instalación es de 6, pondremos 3

- **Caso consumidor 5 kW:**

$$n_{max} = \frac{600}{55,744} = 10,76 \approx 10\ paneles$$

$$n_{min} = \frac{40}{36,76} = 1,01 \approx 2\ paneles$$

- **Caso consumidor 7,5 kW:**

$$n_{max} = \frac{1100}{55,744} = 19,73$$

$$n_{min} = \frac{140}{36,76} = 3,808$$

4.2.2 Coste de la instalación fotovoltaica

A continuación, se procederá con la estimación del coste de la instalación fotovoltaica para cada usuario. Para realizar el cálculo se tendrá en cuenta el coste de los paneles solares y el inversor. Para el resto de la instalación, el coste de los paneles solares, puede suponer hasta el 40% de la instalación [77], por lo que en nuestro caso, tomará como suposición que el coste en conjunto de los paneles y el inversor tiene un peso total del 80% en la instalación. Pudiendo obtener así una cifra que refleje la inversión inicial total para evaluar la viabilidad económica de una instalación fotovoltaica de autoconsumo.

- **Caso consumidor 3,5 kW:**

Teniendo en cuenta que el panel fotovoltaico de JA Solar elegido tiene un coste a diciembre de 2025 de 84,90€ [78] y el inversor que se ha escogido para esta instalación, SUN2000-3.68K-LBO, puede ser comprado por 701,95 € [79]. El coste de los paneles y el inversor será de:

$$C_{P\&I(1)} = 84,90 \times 6 + 701,5 = 1210,90\text{€}$$

$$C_{Inst(1)} = 1210,90 \times \frac{100}{80} = 1513,63\text{€}$$

Además del coste de los materiales, debemos tener en cuenta el coste de la legalización, para instalaciones de menos de 10 kW. Esta legalización tiene un coste de alrededor de 363€ [80]. Por lo que el coste total de una instalación de autoconsumo para un consumidor con una potencia de 3,5 kW, será de en torno a 1876,63€.

- **Caso consumidor 5 kW:**

Para este caso los módulos empleados, son los mismos módulos que se han empleado en el caso anterior. El inversor, en este caso el inversor SUN2000-8KTL-M1 se puede comprar en Leroy Merlin a diciembre de 2025 por 773€. Repitiendo lo anterior, el coste para la instalación sería de:

$$C_{P\&I(2)} = 84,90 \times 9 + 773 = 1573,70\text{€}$$

$$C_{Inst(2)} = 1573,70 \times \frac{100}{80} = 1967,13\text{€}$$

Añadiendo el coste de la legalización para instalaciones con potencia menor a 10 kW, la instalación tendría un coste total de 2330,13€.

- **Caso consumidor 7,5 kW:**

Para este caso los módulos empleados, son los mismos módulos que se han empleado en el caso anterior. El inversor, en este caso el inversor SUN2000-5K-LBO se puede comprar en Leroy Merlin a diciembre de 2025 por 1295€. Repitiendo lo anterior, el coste para la instalación sería de:

$$C_{P\&I(2)} = 84,90 \times 13 + 1295 = 2398,7\text{€}$$

$$C_{Inst(2)} = 2398,7 \times \frac{100}{80} = 2998,38\text{€}$$

Añadiendo el coste de la legalización, la instalación tendría un coste total de 3361,38€.

4.2.3 Ahorros producidos por la instalación fotovoltaica.

Particularizando para cada uno de los consumidores:

- **Caso consumidor 3,5 kW:**

El primer consumidor con un consumo de energía de 1233,75 kWh/mes y una instalación de 3510 kW_p, teniendo en cuenta el aporte de la fotovoltaica, el consumo facturable mensual de este consumidor sería de 962,28 kWh/mes, 32,076 kWh/día, repartidos en 12,908kWh para el tramo de punta, 11,945 kWh

para el tramo llano y 7,223 kWh para el periodo de valle.

Aplicando los cálculos para el coste de la energía:

$$C_{ECons3(L)}' = 387,25 \cdot (0,034234 + 0,058305) + 358,34 \cdot (0,016540 + 0,011661) + 216,69 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 46,59 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3(FDS)}' = 962,28 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 2,88 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3} = C_{ECons3(L)}' \cdot \frac{5}{7} + C_{ECons3(FDS)}' \cdot \frac{2}{7} = 34,10 \text{ €/mes}$$

- **Caso consumidor 5 kW:**

$$C_{ECons3(L)}' = 548,25 \cdot (0,034234 + 0,058305) + 507,32 \cdot (0,016540 + 0,011661) + 309,51 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 65,97 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3(FDS)}' = 1365,09 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 4,09 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3} = C_{ECons3(L)}' \cdot \frac{5}{7} + C_{ECons3(FDS)}' \cdot \frac{2}{7} = 48,29 \text{ €/mes}$$

- **Caso consumidor 7,5 kW:**

$$C_{ECons3(L)}' = 828,17 \cdot (0,034234 + 0,058305) + 766,34 \cdot (0,016540 + 0,011661) + 464,32 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 99,64 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3(FDS)}' = 2058,83 \cdot (0,000079 + 0,002915) = 6,16 \text{ €/mes}$$

$$C_{ECons3} = C_{ECons3(L)}' \cdot \frac{5}{7} + C_{ECons3(FDS)}' \cdot \frac{2}{7} = 72,93 \text{ €/mes}$$

Teniendo en cuenta los nuevos costes de consumo, la factura actual teniendo en cuenta la fotovoltaica para cada consumidor sería de:

Potencia pico contratada (kW)	3,5	5	7,5
Coste término de potencia	8,51 €	11,51 €	17,27 €
Coste energía consumida	34,10 €	48,29 €	72,93 €
Alquiler de equipos	0,81 €	0,81 €	1,36 €
TOTAL SIN IMPUESTOS	43,42 €	60,61 €	91,56 €
Impuesto especial sobre la electricidad	2,22 €	3,10 €	4,68 €
Impuesto sobre el valor añadido (IVA)	9,58 €	13,38 €	20,21 €
TOTAL	55,22 €	77,09 €	116,45 €

Tabla 2. Facturación eléctrica de cada usuario con la instalación de fotovoltaica

Estos nuevos costes suponen unos costes anuales de 662,66 € para el primer consumidor, 925,05 € para el segundo y 1397,73 € para el tercero.

El ahorro producido por la instalación fotovoltaica será por tanto la diferencia entre el coste sin la energía fotovoltaica y el coste con instalación fotovoltaica.

- **Caso consumidor 3,5 kW:**

$$Ahorro_{FV1} = 889,91 - 662,66 = 227,25 \text{ €}$$

- **Caso consumidor 5 kW:**

$$Ahorro_{FV2} = 1256,25 - 925,05 = 331,20 \text{ €}$$

- **Caso consumidor 7,5 kW:**

$$Ahorro_{FV3} = 1886,59 - 1397,43 = 489,16 \text{ €}$$

4.2.4 Rentabilidad de la instalación fotovoltaica

Como ya se explicó, para evaluar la rentabilidad de cada instalación, será necesario medir su VAN. No se tendrá en cuenta la inflación ni la pérdida de rendimiento. Como costes adicionales, se tendrá en cuenta un mantenimiento de las placas cada 5 años, con un coste del 5% de la inversión inicial, que en sería de 75,68 €, 98,36 € y de 149,42 €, para cada usuario, destinados a revisión del cableado, estructura, protecciones, inspección visual de los paneles, limpiezas etc.

Se ha aplicado una tasa de descuento del 4 % para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), buscando reflejar la rentabilidad mínima exigida para que el proyecto de autoconsumo fotovoltaico sea considerado económicamente viable. Esta tasa se ha estimado directamente a partir del nuevo entorno de tipos de interés oficiales del Banco Central Europeo (BCE), que se sitúa en el 2 % [81], como indicador primario del coste de oportunidad del capital "libre de riesgo", considerando una instalación fotovoltaica residencial debido al estado del mercado como una inversión muy estable.

A esta base del se le ha añadido una prima de riesgo del 2 %, cuyo objetivo es compensar el riesgo y la incertidumbre inherentes a una inversión doméstica en autoconsumo fotovoltaico (riesgos técnicos, operacionales y regulatorios).

De este modo, la tasa de descuento del 4 % refleja la suma del coste de oportunidad basal del dinero más el margen exigido por el inversor para asumir el riesgo específico del proyecto.

De forma complementaria, el TIR nos ayudará a entender sobre la viabilidad de cada instalación.

- **Caso consumidor 3,5 kW:**

Se muestra a continuación, el VAN para la instalación fotovoltaica del primer consumidor. Se considera un año 0 para la instalación y que empieza a dar beneficios al año siguiente. Se consideran también los primeros 20 años, ya que, aunque la vida útil de este tipo de instalaciones se calcula en 25 años, se evita la incertidumbre de los últimos años de vida de la instalación donde se esperan más fallos. Además, se espera obtener beneficios lo antes posible, por lo que un horizonte de 20 años es más que suficiente para comprobar si es rentable o no.

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	Gastos	VAN
0	1.513,63 €	0	0	-1.513,63 €
1	0	227,25 €	0	-1.295,12 €
5	0	227,25 €	75,68 €	-564,16 €
8	0	227,25 €	0	-45,82 €
9	0	227,25 €	0	113,84 €
10	0	227,25 €	75,68 €	216,24 €
15	0	227,25 €	75,68 €	857,67 €
20	0	227,25 €	75,68 €	1.384,88 €

Tabla 3. VAN calculado a 20 años para la instalación fotovoltaica para un usuario de consumo bajo.

La inversión en autoconsumo fotovoltaico analizada demuestra ser económicamente viable al generar un Valor Actual Neto (VAN) positivo de 1.384,88 € al final del periodo de 20 años, utilizando una tasa de descuento del 4,00%. El proyecto recupera la inversión inicial de 1.513,63 € en un plazo muy competitivo, ya que en el año 8 el VAN acumulado es de -45,82 € y se vuelve positivo en el año 9. Se incluyen además los años 10, 15 y 20 para añadir una mayor trazabilidad.

El TIR para esta instalación calculado para estos 20 primeros años es del 13,008%, el cual es mucho mayor que la tasa de descuento establecida del 4%. Lo que se traduce en un proyecto rentable.

- **Caso consumidor 5 kW:**

Se muestra la tabla del VAN generado para este consumidor, destacando los años en los que se realizan los mantenimientos.

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	Gastos	VAN
0	1.967,13 €	0,00 €	0,00 €	-1.967,13 €
1	0,00 €	331,20 €	0,00 €	-1.648,67 €
5	0,00 €	331,20 €	98,36 €	-573,53 €
7	0,00 €	331,20 €	0,00 €	-60,09 €
8	0,00 €	331,20 €	0,00 €	181,91 €
10	0,00 €	331,20 €	98,36 €	571,91 €
15	0,00 €	331,20 €	98,36 €	1.513,38 €
20	0,00 €	331,20 €	98,36 €	2.287,20 €

Tabla 4. VAN calculado a 20 años para la instalación fotovoltaica para un usuario de consumo medio.

Al igual que el caso anterior, la inversión demuestra también ser viable generando un VAN positivo a partir del año 8, lo que podemos considerar un plazo de tiempo adecuado. Al final de los 20 años, el VAN asciende a los 2287,20 €.

Calculando la TIR para esta instalación se calcula en un 15,137%, superando ampliamente la tasa de descuento prevista. Es por ello que el proyecto puede considerarse rentable.

- **Caso consumidor 7,5 kW:**

Para el tercer consumidor los resultados del VAN cada año serían:

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	Gastos	VAN
0	2.988,38 €	0,00 €	0,00 €	-2.988,38 €
1	0,00 €	489,16 €	0,00 €	-2.518,03 €
5	0,00 €	489,16 €	149,42 €	-933,54 €
7	0,00 €	489,16 €	0,00 €	-175,23 €
8	0,00 €	489,16 €	0,00 €	182,20 €
10	0,00 €	489,16 €	149,42 €	755,39 €
15	0,00 €	489,16 €	149,42 €	2.143,57 €
20	0,00 €	489,16 €	149,42 €	3.284,55 €

Tabla 5. VAN calculado a 20 años para la instalación fotovoltaica para un usuario de consumo alto.

Para el último consumidor, de la misma forma que en el caso anterior, el VAN empieza a ser positivo a partir del año 8, lo que nos asegura ser un proyecto rentable. Finalmente, en el plazo de los 20 años, el VAN llega a ascender a 3284,55 €.

Para este caso, la TIR asciende al 14,597%. Por lo que al igual que los casos anteriores, el proyecto resultaría rentable.

4.3 Estudio del ahorro de viviendas con implantación de dispositivos IoT

4.3.1 Dimensionamiento de la instalación de dispositivos IoT

4.3.1.1 Dimensionamiento de dispositivos IoT para iluminación

Una vivienda promedio tiene un número medio de alrededor de 23 puntos de luz, y que este número es de 26 para viviendas unifamiliar [1]. Tomaremos como base que una vivienda media de 4,5 kWp, podría tener 24 puntos de luz totales. Extrapolando a los casos de este estudio, una vivienda de 3,5 kWp tendrá alrededor de 19 puntos de luz. Para la de 5 kWp, se considerarán 27 puntos de luz, y para la de 7 kWp, 40.

Se considerará que alrededor del 50% son bombillas, un 30% serán focos leds empotrables y el 20% similares a plafones, lo que por cada caso se obtendrían.

Consumidor	3,5 kWp	5 kWp	7,5 kWp
Bombillas	9	14	20
Foco empotrable	6	8	12
Plafón	4	5	8
Totales	19	27	34

Tabla 6. Número de dispositivos de iluminación inteligente por usuario y tipo de dispositivo.

Para los detectores de presencia, pueden ser estimados en base a la suposición de espacios de poco tiempo de uso que tendrán según el tipo de vivienda que sean. En el primer caso, se considera que una casa de una sola planta tendría un baño, un pasillo, y un recibidor, dando un total de tres zonas de poca ocupación.

Para el segundo consumidor, con vivienda de dos plantas adosada, tendría dos baños, dos pasillos, uno por cada planta, la escalera y un cuarto de almacenaje, resultando en un total de seis zonas de poca ocupación.

El último consumidor tiene un baño más que el caso anterior, un recibidor amplio y un garaje. Por lo que contaría con 9 zonas de paso o baja ocupación.

Instalando detectores de presencia en cada sala, el primer consumidor instalaría 3 detectores, el segundo 6 y el tercero 9, añadiendo unos 3 detectores por cada 2,5 kWp.

4.3.1.2 Dimensionamiento de dispositivos IoT para HVAC

Recordando el equipamiento para HVAC de los hogares españoles, un consumidor medio en términos de calefacción, un hogar promedio dispone de 1,3 equipos de calefacción y de 3 equipos de aire acondicionado. Al igual que para iluminación se extrapola a cada caso.

Para el caso de perfil de menos consumo, dispondría de una bomba de calor, que se usa tanto para calefacción como para refrigeración en la estancia principal. Además de este equipo, también cuentan con un equipo de aire

acondicionado para la habitación.

En el caso medio, con un consumo parecido al promedio, contaría también con una bomba de calor reversible en la estancia principal y dos splits en dos dormitorios.

El tercer consumidor, contaría con una bomba de calor reversible central para la planta baja, además contaría con splits en 2 dormitorios y un radiador portátil para una sala de estudio en la primera planta.

De esta forma, el número de termostatos inteligentes por consumidor, excluyendo los equipos portátiles que se enchufarían en casos de apoyos a necesidad del usuario, serían de 1 para el consumidor de menos consumo, 3 para el consumidor intermedio y 3 para el tercer consumidor. Esta igualdad entre el segundo y tercer consumidor se debe a la adopción del tercer consumidor de un sistema central que puede dar servicio a más estancias.

4.3.1.3 Dimensionamiento de dispositivos IoT para electrodomésticos

Considerando el promedio de una vivienda en España, una vivienda tiene 3,8 aparatos de gama blanca y 6,7 de gama marrón. Ya que el promedio de potencia como se mencionó anteriormente es de 4,5 kWp, podemos extrapolar a los demás casos.

El consumidor con potencia contratada de 3,5 kWp, tendría 3 electrodomésticos de gama blanca, considerando que cuenta con frigorífico con congelador integrado, horno y lavadora. También dispondría de 5 aparatos de gama marrón, entre los que se incluyen un televisor, dos ordenadores, tanto de sobremesa como portátil, consola de videojuegos y router wifi.

El segundo consumidor, contaría con 4 electrodomésticos de gama blanca, añadiendo un lavavajillas a los del primer consumidor. En cuanto a gama marrón, este consumidor poseería 7 electrodomésticos de gama marrón, sumando al caso anterior dos televisores adicionales.

Finalmente, para el consumidor con una potencia contratada de 7,5 kWp, se estima que dispone de 6 electrodomésticos de gama blanca. Estos incluirían frigorífico y congelador separados, lavadora, horno, lavavajillas y secadora. Además, este perfil de consumo contaría con 11 aparatos de gama marrón. En este caso además de los televisores que tendría el consumidor del caso anterior, también dispondría de una barra de sonido, repetidor wifi, una consola adicional e impresora.

Al implementar enchufes inteligentes, se hará una exclusión específica para ciertos aparatos esenciales. Los frigoríficos y congeladores no serán conectados a estos enchufes, ya que requieren un suministro eléctrico ininterrumpido para la conservación segura de los alimentos. De manera similar, los routers y repetidores Wi-Fi también serán excluidos de esta automatización, asegurando así la conectividad constante de la vivienda, fundamental para el funcionamiento de todos los dispositivos inteligentes y el control domótico del hogar. Se excluyen los equipos que no estén permanentemente enchufados como portátiles.

También se tiene en cuenta la cercanía de los equipos, por una barra de sonido, se conectaría cerca de la televisión a la que da servicio, o una impresora se conectará por lo general cerca de un ordenador. Haciendo esa consideración, en los equipos que se instalen cercanos los unos a los otros, se instalará una regleta en lugar de un enchufe, ya que son más económicas por dispositivo y pueden dar servicio además a cargadores de un portátil o de móvil por ejemplo.

En el caso del primer consumidor, se instalaría una regleta dando servicio al televisor y a la consola, al igual que para el segundo consumidor, instalando enchufes en el resto de los equipos. El consumidor con más potencia colocará una regleta para la impresora y el ordenador, otra para la tele de la estancia principal con la barra de sonido y una tercera para uno de los televisores y las dos consolas, en la habitación destinada al ocio.

Se muestra en la siguiente tabla, el número de enchufes y regletas instalados por cada consumidor.

Consumidor	3,5 kWp	5 kWp	7,5 kWp
Enchufes	3	7	5
Regletas	1	1	3

Tabla 7. Número de enchufe y regletas inteligentes para cada consumidor.

4.3.2 Coste de la instalación IoT

El coste de la instalación IoT, se calcula multiplicando cada dispositivo instalado por su coste. Todos los precios que se mencionan, han sido tomados a diciembre de 2025.

Para la iluminación, las bombillas inteligentes de Ikea, tendrían un precio de 3,5 €/pack de 2 Uds, los plafones se pueden comprar en Amazon por 24,69 € y los focos empotrables por 17,76 €/2 Uds. Los sensores de presencia tienen un coste de 6,95 €. Tomando estos precios de referencia, la instalación de IoT para iluminación.

$$C_{IoTILUM1} = \frac{3,5}{2} \times 9 + \frac{17,76}{2} \times 6 + 24,69 \times 4 + 6,95 \times 3 = 204,17 \text{ €}$$

$$C_{IoTILUM2} = \frac{3,5}{2} \times 14 + \frac{17,76}{2} \times 8 + 24,69 \times 5 + 6,95 \times 6 = 284,84 \text{ €}$$

$$C_{IoTILUM3} = \frac{3,5}{2} \times 20 + \frac{17,76}{2} \times 12 + 24,69 \times 8 + 6,95 \times 9 = 436,13 \text{ €}$$

El coste de cada termostato es de 139 €, de modo que el primer consumidor, al adquirir solo una unidad, incurre en un gasto de 139 € por dispositivos IoT para HVAC, mientras que los otros dos consumidores, al comprar tres termostatos cada uno, tienen un gasto individual de 417 €.

Los enchufes inteligentes de Shelly, están disponibles en Mediamarkt a un precio de 20,99 € [60], y las regletas TP Link, tienen un precio de 32,99 €, por lo que el precio para la instalación de dispositivos para la regulación de electrodomésticos de cada consumidor tendría un coste

$$C_{IoTTELEC1} = 20,99 \times 3 + 32,99 \times 1 = 95,96 \text{ €}$$

$$C_{IoTTELEC2} = 20,99 \times 7 + 32,99 \times 1 = 179,92 \text{ €}$$

$$C_{IoTTELEC3} = 20,99 \times 5 + 32,99 \times 3 = 203,92 \text{ €}$$

El coste de cada consumidor por tipo de dispositivo y total se presenta en la siguiente tabla.

	3,5 kWp	5 kWp	7,5 kWp
Iluminación	204,17 €	284,84 €	436,13 €
HVAC	139,00 €	417,00 €	417,00 €
Electricidad	95,96 €	179,92 €	203,92 €
Total	439,13 €	881,76 €	1.057,05 €

Tabla 8. Inversión inicial para cada consumidor en dispositivos IoT.

4.3.3 Ahorros producidos por la instalación IoT

Recapitulando los ahorros considerados para IoT, se tendrá en cuenta para los ahorros de iluminación para la iluminación inteligente un ahorro de entre el 7% y el 27% del ahorro total de la iluminación [49], se tomará por tanto una cifra intermedia, es decir del 17%. Para los sensores de presencia, se considera un retardo de 10 minutos, lo que supone un ahorro del 32%. Como se implantan solo en zonas de baja ocupación, se considera un 32% del 15% del total de la iluminación, es decir 4,8% de la iluminación. Sumando ambos ahorros, se prevé un ahorro para iluminación del 21% [50].

Los termostatos inteligentes, presentan un ahorro del 15% en equipos de HVAC, no obstante, al no haberse implantado termostatos en el total de los equipos, no se puede tomar esta cifra como absoluta, aunque los equipos en los que se ha instalado son los equipos principales, por lo que se supone un consumo del 80% del total, para climatización, lo que significaría un ahorro del 12% del total de clima.

Finalmente, enchufes y regletas, al no tener detectores de presencia y no clasificarse como nivel 2, presentan ahorros de entre el 16% y el 20% del consumo de standby [49]. Tomando una cifra intermedia, los ahorros en standby, serán del 18%.

Para cuantificar es necesario también conocer el porcentaje de uso que suponen en la electricidad la iluminación, los equipos para climatización y el standby. Como ya se mencionó antes, la iluminación supone un 11,75% del consumo eléctrico, los equipos de clima sumando calefacción, 7,36 % y aire acondicionado, 2,34% del total, resultan en un 9,7% del total de la electricidad y, y el standby un 10,7% del total de los electrodomésticos, los cuales suponen un un 61,79%, lo quiere decir que el standby supone un 6,6% del total del consumo eléctrico.

Como objeción, tanto los equipos de clima como el standby, se suponen que afectan a todo el día, sin embargo, la iluminación en general sólo es usada en momentos de poca visibilidad. Esto significaría cuantificar el porcentaje real en las horas en las que realmente se usa la iluminación. No obstante, la iluminación es usada en los tres tramos de potencia, por lo que, para simplificar cálculos, se tendrá en cuenta que afecta a todo el día.

Calculando el impacto real en el consumo para cada usuario:

$$\%Ahorro_{IoT} = \frac{21}{100} \times 11,75 + \frac{12}{100} \times 9,7 + \frac{18}{100} \times 6,6 = 4,82\%$$

Por tanto, los dispositivos IoT, tendrían un impacto de una reducción del en torno al 4,82% del consumo total de la factura eléctrica.

- **Consumidor con potencia 3,5 kW:**

Con los ahorros implementados por los dispositivos IoT, el consumo mensual de este consumidor es de 1174,28 kWh frente a los 1233,75 kWh que consume sin estos dispositivos. Suponiendo un ahorro mensual de 3 €.

- **Consumidor con potencia 5 kW:**

Este consumidor, después de implementar dispositivos IoT, tendría un consumo de 1677,55 kWh, anteriormente 1762,50 kWh. Lo cual tiene un impacto de 4,29 € mensuales en su factura eléctrica.

- **Consumidor con potencia 7,5 kW:**

Para el último caso, el consumidor, conseguiría unos ahorros de 127,43 kWh mensuales, lo que se traduciría en 6,36 € mensuales.

A continuación, se adjunta la tabla con los nuevos costes para la factura actual de cada uno de los consumidores:

Potencia pico contratada (kW)	3,5	5	7,5
Coste término de potencia	8,51 €	11,51 €	17,27 €
Coste energía consumida	46,63 €	66,62 €	99,99 €
Alquiler de equipos	0,81 €	0,81 €	1,36 €
TOTAL SIN IMPUESTOS	55,95 €	78,94 €	118,61 €
Impuesto especial sobre la electricidad	2,86 €	4,04 €	6,06 €
Impuesto sobre el valor añadido (IVA)	12,35 €	17,42 €	26,18 €
TOTAL	71,16 €	100,40 €	150,86 €

Tabla 9. Facturación para cada usuario con dispositivos IoT.

En cuanto a los ahorros anuales, para el primer consumidor, sus ahorros serían de 36 € anuales, para el segundo el ahorro anual alcanzaría los 51,48 € y para el tercero, el ahorro sería de 76,32 €.

4.3.4 Rentabilidad de la instalación IoT

Siguiendo el análisis de rentabilidad, evalúa la viabilidad de la instalación de los dispositivos de Internet de las Cosas (IoT). En este caso, para el cálculo del VAN, la inversión inicial será la compra de dispositivos IoT por parte de cada usuario en su caso particular y los ingresos serán los ahorros producidos. En este caso no se tienen en cuenta gastos, ya que estos dispositivos no requieren de mantenimientos como sí los requerían la instalación fotovoltaica.

Se mantiene la misma tasa de descuento del 4 % para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN). Si bien es cierto que la inversión en dispositivos IoT podría conllevar una mayor incertidumbre técnica y operativa en comparación con una instalación fotovoltaica ya establecida, la inversión inicial necesaria es considerablemente menor. Esta reducción en la cuantía de la inversión disminuye significativamente la exposición al riesgo financiero total.

Por lo tanto, la tasa del 4 %, que refleja la suma del coste de oportunidad y una prima de riesgo moderada, se considera apropiada para mantener la coherencia y reflejar la rentabilidad mínima exigida para este proyecto complementario.

Al igual que con la instalación fotovoltaica, el VAN será la métrica principal para determinar la rentabilidad de cada instalación IoT, y la Tasa Interna de Retorno (TIR) se empleará de forma complementaria para obtener una visión más completa sobre su viabilidad económica. Se muestra a continuación los resultados para cada consumidor.

- **Consumidor de potencia 3,5 kW:**

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	VAN
0	439,13 €	0,00 €	-439,13 €
1	0,00 €	36,00 €	-404,51 €
5	0	36,00 €	-278,86 €
10	0,00 €	36,00 €	-147,14 €
15	0,00 €	36,00 €	-38,87 €
17	0,00 €	36,00 €	-1,17 €
18	0,00 €	36,00 €	16,60 €
20	0,00 €	36,00 €	50,12 €

Tabla 10. VAN calculado a 20 años de dispositivos IoT para un usuario de consumo bajo.

Observando los resultados, se observa que el VAN se vuelve positivo tras 18 años. A pesar de que tras ese tiempo ya genera beneficios, un plazo de recuperación tan extenso es inviable para los beneficios que genera.

La TIR calculada para estos dispositivos en el plazo de 20 años es de 5,254 %, superando muy ligeramente a la tasa de descuento.

- **Consumidor de potencia 5 kW:**

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	VAN
0	881,76 €	0,00 €	-881,76 €
1	0,00 €	51,48 €	-832,26 €
5	0,00 €	51,48 €	-652,58 €
10	0,00 €	51,48 €	-464,21 €
15	0,00 €	51,48 €	-309,39 €
20	0,00 €	51,48 €	-182,13 €

Tabla 11. VAN calculado a 20 años de dispositivos IoT para un usuario de consumo medio.

Para esta instalación, al observarse los resultados tras 20 años, el VAN sigue siendo negativo, por lo que no resulta económicamente rentable.

La TIR de este proyecto es 1,52% lo que no llega ni a superar el tipo de interés de BCE del 2%. Por lo que mucho menos alcanza el 4% establecido.

- **Consumidor de potencia 7,5 kW:**

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	VAN
0	1.057,05 €	0,00 €	-1.057,05 €
1	0,00 €	76,32 €	-983,67 €
5	0,00 €	76,32 €	-717,29 €
10	0,00 €	76,32 €	-438,03 €
15	0,00 €	76,32 €	-208,49 €
20	0,00 €	76,32 €	-19,84 €

Tabla 12. VAN calculado a 20 años de dispositivos IoT para un usuario de consumo alto.

Al igual que en el caso anterior, tras 20 años el VAN sigue siendo negativo, lo que resulta en un proyecto para nada factible.

El TIR de este proyecto para 20 años es de 3,787%, lo que supera al caso anterior, pero no consigue superar siquiera la tasa de descuento estimada del 4%.

4.4 Estudio del ahorro de viviendas con la combinación de generación renovable y dispositivos IoT

4.4.1 Coste conjunto de la instalación fotovoltaica y de dispositivos IoT

El coste conjunto de la instalación fotovoltaica y de los dispositivos IoT. La suma de ambas inversiones, para cada consumidor, queda reflejada en la tabla 13.

	3,5 kWp	5 kWp	7,5 kWp
Fotovoltaica	1.513,63 €	1.967,13 €	2.998,38 €
IoT	439,13 €	881,76 €	1.057,05 €
TOTAL	1.952,76 €	2.848,89 €	4.055,43 €

Tabla 13. Inversión inicial de cada consumidor para las instalaciones.

4.4.2 Ahorros producidos en conjunto por la instalación fotovoltaica y los dispositivos IoT

Los ahorros que se producen con la combinación de ambas tecnologías se calculan aplicando lo ya visto hasta ahora. Es decir, la curva de consumo actual sería la misma que en el caso del consumo con implementación de dispositivos IoT. Por otra parte, la curva de generación fotovoltaica seguiría siendo la misma, por lo que los ahorros obtenidos con la combinación de ambos dispositivos serán la diferencia entre ambas curvas.

En este caso, el consumo facturable de cada consumidor sería de 1174,28 kWh para el consumidor con el consumo más bajo, 1290,07 kWh para el consumidor intermedio y 1945,56 kWh. Al igual que en los casos anteriores, se muestra la tabla del coste eléctrico de cada consumidor.

Potencia pico contratada (kW)	3,5	5	7,5
Coste término de potencia	8,51 €	11,51 €	17,27 €
Coste energía consumida	32,17 €	45,56 €	68,79 €
Alquiler de equipos	0,81 €	0,81 €	1,36 €
TOTAL SIN IMPUESTOS	41,48 €	57,88 €	87,42 €
Impuesto especial sobre la electricidad	2,12 €	2,96 €	4,47 €
Impuesto sobre el valor añadido (IVA)	9,16 €	12,78 €	19,30 €
TOTAL	52,76 €	73,62 €	111,18 €

Tabla 14. Facturación mensual de cada consumidor con instalación fotovoltaica y dispositivos IoT.

Con estos costes, el ahorro anual de cada consumidor desde el consumidor con menos consumo hasta aquel con el consumo más elevado de 256,76 €, 372,83 €, y 552,39 € respectivamente.

4.4.3 Rentabilidad resultada de ambas tecnologías

Aunque el análisis individual de los dispositivos IoT muestra que su rentabilidad es limitada o negativa bajo las condiciones actuales de mercado, su estudio en conjunto con la tecnología fotovoltaica es fundamental en este trabajo debido al papel que desempeñan. La justificación de su implementación no reside en el ahorro directo que generan por sí solos, sino en su capacidad para actuar sobre la demanda y maximizar el aprovechamiento de la energía solar generada.

La sinergia entre ambas tecnologías permite transformar el perfil de consumo del usuario. Mientras que la fotovoltaica es una tecnología de generación intermitente, el IoT introduce una gestión inteligente que intenta desplazar las cargas hacia las horas de mayor radiación. Al reducir el área de la curva de consumo en horas sin sol y optimizarla durante las horas de producción, el IoT incrementa la tasa de autoconsumo directo. Esto provoca que la proporción de energía de la curva solar utilizada sea mayor que en una instalación convencional, mejorando así la viabilidad económica global del conjunto y justificando su análisis dentro de una estrategia de optimización integral.

Es por ello que es importante analizar los resultados, para determinar la viabilidad real de la aplicación de ambas tecnologías.

Como consideraciones, se ha considerado mantener la tasa de descuento al 4%, ya que aunque los dispositivos IoT por sí mismos no resulten rentables, la fotovoltaica sí lo es y el peso de la inversión recae alrededor del 75% en la instalación fotovoltaica. Además, como se mencionó, el impacto de la fotovoltaica tras la instalación de dispositivos IoT es ahora mayor.

- **Consumidor de potencia 3,5 kW:**

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	Gastos	VAN
0	1.952,76 €	0,00 €	0,00 €	-1.952,76 €
1	0,00 €	256,76 €	0,00 €	-1.705,88 €
5	0,00 €	256,76 €	75,68 €	-871,91 €
9	0,00 €	256,76 €	0,00 €	-105,87 €
10	0,00 €	256,76 €	75,68 €	16,46 €
20	0,00 €	256,76 €	75,68 €	1.346,80 €

Tabla 15. VAN calculado a 20 años de con combinación de fotovoltaica y dispositivos IoT para un usuario de consumo bajo.

Al comprobar los resultados, se contempla un panorama financiero sólido, volviéndose el VAN positivo a los 10 años. A los 20 años, el VAN es de 1346,80 €.

El TIR para este consumidor tras instalar fotovoltaica en combinación con dispositivos IoT es del 10,961%, superando ampliamente el 4 % establecido y demostrando ser una inversión fiable.

- **Consumidor de potencia 5 kW:**

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	Gastos	VAN
0	2.848,89 €	0,00 €	0,00 €	-2.848,89 €
1	0,00 €	382,68 €	0,00 €	-2.480,93 €
5	0,00 €	382,68 €	98,36 €	-1.226,11 €
9	0,00 €	382,68 €	0,00 €	-84,38 €
10	0,00 €	382,68 €	98,36 €	107,70 €
20	0,00 €	382,68 €	98,36 €	2.105,07 €

Tabla 16. VAN calculado a 20 años de con combinación de fotovoltaica y dispositivos IoT para un usuario de consumo medio.

El VAN, para el consumidor de potencia intermedia, transita a valores positivos justo al llegar a los 10 años, lo que indica una recuperación de la inversión en un tiempo razonable. Al finalizar el período de análisis, a los 20 años, el VAN alcanza los 2.105,07 €.

El TIR en este caso se calcula en 11,394 %, lo que indica, que la inversión es factible.

- **Consumidor de potencia 7,5 kW:**

AÑO	Inversión Inicial	Ingresos	Gastos	VAN
0	4.045,43 €	0,00 €	0,00 €	-4.045,43 €
1	0,00 €	565,48 €	0,00 €	-3.501,70 €
5	0,00 €	565,48 €	75,68 €	-1.590,22 €
8	0,00 €	565,48 €	0,00 €	-300,40 €
9	0,00 €	565,48 €	0,00 €	96,90 €
10	0,00 €	565,48 €	75,68 €	427,79 €
20	0,00 €	565,48 €	75,68 €	3.449,73 €

Tabla 17. VAN calculado a 20 años de con combinación de fotovoltaica y dispositivos IoT para un usuario de consumo alto.

Para el último consumidor, la combinación de ambas tecnologías devolvería valores positivos del VAN a partir del año 9, indicando una recuperación aceptable de la inversión. Al final del horizonte de los 20 años, el VAN esperado es de 3449,73 € por lo que se considera una inversión sólida en el largo plazo.

El TIR para el último consumidor con la instalación de fotovoltaica y dispositivos IoT, resulta en un 12,354 %, lo que demuestra una inversión rentable.

4.5 Discusión de los resultados

4.5.1 Instalación Fotovoltaica

Al observar los resultados de la rentabilidad para una instalación fotovoltaica, con TIR calculadas para cada consumidor de menor a mayor potencia, 13,008 %, 15,137 % y 14,597 %. Se observa que los módulos fotovoltaicos para usuarios residenciales, supone una inversión altamente rentable, obteniendo un promedio de la TIR superior al 14 %. Y unos periodos de retornos de la inversión en plazo inferiores a los 10 años.

La diferencia entre las TIR, no radica tanto en el consumo de cada consumidor sino en la potencia instalada de la instalación. Esto se debe, mirando a la Figura 31, la curva de generación fotovoltaica se hace cada vez mayor, eliminando una mayor área de la curva de consumo. No obstante, esta curva no puede crecer ilimitadamente, pues las horas en las que la instalación produce energía, está limitada por las horas de sol. Es por esa razón que la instalación que devuelve una TIR más alta, es decir la instalación del consumidor con la potencia intermedia, es la que presenta una fotovoltaica ligeramente sobredimensionada respecto a su consumo.

Potencia pico de cada consumidor	3,5 kWp	5 kWp	7,5 kWp
Sobredimensionamiento de la fotovoltaica	0,29%	5,30%	1,40%
TIR	13,01%	15,14%	14,60%

Tabla 18. Comparación del sobredimensionamiento de la instalación fotovoltaica respecto a la potencia pico contratada y el TIR calculado para cada instalación.

Otra cuestión no abarcada en este estudio sería el aprovechamiento de la energía cuando la fotovoltaica genera

un consumo por encima del consumo que se está produciendo en ese momento mediante el uso de una batería física o de baterías virtuales. La causa de no haber realizado este estudio se debe a la intención de demostrar que aún sin ese aprovechamiento de la energía, la inversión resultaría rentable.

En este trabajo, tampoco se ha tenido en cuenta las subvenciones públicas a instalaciones de autoconsumo recogidas en el Real Decreto 477/2021 [17] que, para instalaciones fotovoltaicas, dentro del programa de incentivos 4, contemplan entre 300 y 600 € kWp instalado. Lo que significaría, en el peor de los casos, la remuneración de la mayor parte de la inversión inicial. Por ejemplo, en el caso del consumidor 1 con 3,51 kWp instalados, la administración costearía 1053 €, es decir cerca del 70 % de su coste inicial. Lo que supondría un periodo de retorno menor y una TIR aún mayor.

4.5.2 Dispositivos IoT

Los dispositivos IoT en cambio, no demuestran ser una inversión rentable. Observando los casos explicados en el estudio, sólo una de las opciones presenta un VAN positivo en el marco de 20 años. No obstante, para una inversión que supone alrededor del 25% del coste de una instalación fotovoltaica para una residencia de una potencia concreta, un horizonte de más de quince años, e incluso de más de diez, en contraste con la fotovoltaica que recupera una inversión mayor en menos tiempo devolviendo mayores beneficios. Además, la inexistencia garantías de que estos aparatos tengan una vida que superen ese horizonte hacen que la opción de implantar dispositivos IoT, no sea rentable.

Esta solución podría ser rentable en casos concretos, o para aplicaciones concretas, como por ejemplo, sensores para iluminación inteligente en lugares donde la interrupción de luz no suponga un problema como por ejemplo pasillos, trasteros e incluso baños, donde los porcentajes de ahorro son más altos [50]. También podría emplearse tecnología IoT en industrias o sector comercial, donde a diferencia del sector residencial, consumos más altos sí podrían justificar estas inversiones.

En la siguiente tabla se muestra el porcentaje del total gastado en cada tipo de dispositivo IoT y el TIR en la inversión de cada usuario.

	3,5 kWp	5 kWp	7,5 kWp
Iluminación	46,49%	32,30%	41,26%
HVAC	31,65%	47,29%	39,45%
Electricidad	21,85%	20,40%	19,29%
TIR	5,254%	1,524%	3,79%

Tabla 19. Comparación entre el porcentaje gastado del total de los dispositivos IoT, y el TIR calculado para la instalación de estos dispositivos

En la tabla 19, se observa como un porcentaje de mayor gasto en dispositivos de iluminación, suponen un mayor porcentaje de ahorro. Por el contrario, los dispositivos HVAC demuestran “lastrar” la inversión siendo los más caros y produciendo ahorros menores.

Cabe destacar también, que los IoT resultan más interesantes cuando su uso es más global. Por ejemplo, cuando una regleta inteligente se usa para 3 dispositivos a la vez en lugar de usar un enchufe, disminuye la inversión lo que provoca que la cantidad a recuperar sea menor.

De igual forma con los dispositivos destinados a HVAC, aunque en este caso, se trata más de una cuestión de los dispositivos que queremos optimizar. Es decir, resulta más económico cuando se trata de un dispositivo de climatización central, pues se usa un solo dispositivo para más áreas.

Esto se ve en el usuario de más potencia, cuyos dispositivos controlan más equipos y sus equipos de clima son abarcan más área, en comparación con el usuario de potencia intermedia. Esta diferencia se refleja en la TIR siendo superior al doble, pese a la mayor inversión del último.

4.5.3 Combinación de las dos tecnologías

En la tabla 20, se muestra el TIR para cada consumidor según la instalación.

	3,5 kWp	5 kWp	7,5 kWp
Fotovoltaica	13,008%	15,137%	14,597%
IoT	5,254%	1,524%	3,787%
Combinación de ambas tecnologías	10,961%	11,394%	12,354%

Tabla 20. TIR para cada usuario según el tipo de instalación.

Aunque la combinación de ambas tecnologías resulta rentable, con TIR superiores al 10% en cada instalación, y la fotovoltaica logre producir más ahorros debido a la bajada de consumo generada por los dispositivos IoT, la tan baja rentabilidad de los dispositivos IoT, suponen una bajada de la rentabilidad que supondría la instalación fotovoltaica por sí sola.

5 CONCLUSIONES

Tras haber examinado la optimización económica en instalaciones eléctricas residenciales mediante la modelización de tres perfiles de consumo distintos, evaluando la rentabilidad de la energía solar fotovoltaica (FV) y la implementación de dispositivos del Internet de las Cosas (IoT), tanto de forma individual como conjunta. La metodología de análisis, basada en el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Rendimiento (TIR) a 20 años, ha arrojado conclusiones claras sobre la viabilidad financiera de estas tecnologías en el entorno doméstico español.

En base a estos hallazgos, se formulan las siguientes recomendaciones para cualquier usuario que contemple la implantación de estas tecnologías avanzadas de gestión energética:

- **Priorizar la Inversión Fotovoltaica:** La energía solar fotovoltaica debe ser considerada como la opción prioritaria de inversión debido a su sólida rentabilidad financiera, asegurando un retorno de capital en un plazo muy competitivo (menos de 10 años). Se recomienda encarecidamente consultar las ayudas y subvenciones vigentes, ya que pueden compensar una parte significativa del desembolso inicial.
- **Dimensionamiento Estratégico de la FV:** Buscar un ligero sobredimensionamiento de la instalación fotovoltaica respecto al consumo actual para maximizar el área de la curva de generación, optimizando así la rentabilidad.
- **Implementación Selectiva del IoT:** Dado que el IoT no resulta rentable por sí mismo, se sugiere una adopción selectiva y estratégica. Priorizar la implementación en aplicaciones de alto impacto porcentual (como sensores de ocupación para iluminación en zonas de paso o standby) para maximizar los ahorros localizados y minimizar la inversión inicial. Se debe tender al uso de dispositivos que optimicen múltiples cargas (regletas inteligentes).
- **Considerar el IoT como Herramienta de Eficiencia y Confort:** El IoT debe verse como un complemento para la eficiencia y la comodidad (control remoto, automatización de horarios) que mejora la gestión proactiva de la energía, y no primariamente como una fuente de alto rendimiento financiero.

En última instancia, si bien la combinación de FV e IoT maximiza el ahorro energético bruto y potencia una vida energéticamente eficiente, la viabilidad económica sigue recayendo fundamentalmente en la capacidad de generación limpia de la fotovoltaica.

6 REFERENCIAS

- [1] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «IDAE,» 16 Julio 2011. [En línea]. Available: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_ACC_f68291a3.pdf. [Último acceso: 6 Julio 2025].
- [2] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «IDAE,» Marzo 2025. [En línea]. Available: <https://informesweb.idae.es/consumo-usos-residencial/informe.php>. [Último acceso: 24 Agosto 2025].
- [3] M. R. Prathyusha y B. Bhowmik, «Development of IoT-based Smart Home Application with Energy Management,» 2023.
- [4] S. B. A. Y. R. K. S. A. K. Tiwari, «Unleashing the Potential of IoT Integration for Energy Optimization in Smart Homes,» 2024.
- [5] Y. Guan, W. Feng, Y. Wu y J. M. Guerrero, «An IoT Platform-based Multi-objective Energy Management System for Residential Microgrids,» de *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2020.
- [6] N. Unidas, «Naciones Unidas,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>. [Último acceso: 22 Julio 2025].
- [7] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «IDAE,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables>. [Último acceso: 4 Agosto 2025].
- [8] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «IDAE,» Junio 2025. [En línea]. [Último acceso: 5 Agosto 2025].
- [9] R. E. d. E. (REE), «Red Eléctrica de España (REE),» Enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/es/informe-del-sistema-electrico/potencia-instalada>. [Último acceso: 4 Agosto 2025].
- [10] R. E. d. E. (REE), «Red Eléctrica de España (REE),» Enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/es/informe-del-sistema-electrico/generacion/generacion-de-energia-electrica/generacion-total-de-energia-electrica>. [Último acceso: 4 Agosto 2025].
- [11] M. p. l. T. E. y. e. R. D. (MITECO), «MITECO,» 24 Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/estrategia-normativa/pniec-23-30.html>. [Último acceso: 7 Agosto 2025].
- [12] A. d. E. d. E. R. (APPA), «APPA,» [En línea]. Available: <https://www.appa.es/appa-autoconsumo/ques-el-autoconsumo/>. [Último acceso: 7 Agosto 2025].
- [13] A. d. E. d. E. R. (APPA), «APPA,» [En línea]. Available: <https://www.appa.es/appa-autoconsumo/situacion-autoconsumo/>. [Último acceso: 7 Agosto 2025].
- [14] España, «Real Decreto-ley 17/2019, de 22 de marzo, por el que se adoptan medidas urgentes para la adaptación de las retribuciones de los regímenes especiales de producción de energía eléctrica a la normativa europea y del mercado,» *Boletín Oficial del Estado*, Vols. %1 de %2BOE-A-2019-5089, pp.

30454-30460, 2019.

- [15] R. E. d. E. (REE), «REE,» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/transicion-ecologica/autoconsumo>. [Último acceso: 10 Agosto 2025].
- [16] A. d. E. d. E. R. (APPA), «APPA,» [En línea]. Available: <https://www.appa.es/appa-autoconsumo/marco-regulatorio-autoconsumo/>. [Último acceso: 7 Agosto 2025].
- [17] España, «Real Decreto-ley 10/2021, de 30 de junio, por el que se adoptan medidas urgentes para la adaptación de la normativa en materia de energía renovable y de otras medidas para la protección del consumidor eléctrico,» *Boletín Oficial del Estado*, Vols. %1 de %2BOE-A-2021-10824, 2021.
- [18] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «IDAE,» [En línea]. Available: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-energias-renovables-en-autoconsumo-almacenamiento-y-termicas-sector>.
- [19] Repsol, «Repsol,» 26 Julio 2025. [En línea]. Available: <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/energia-solar-termica/>.
- [20] R. E. d. E. (REE), «REE,» Enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.sistemaelectricoree.es/es/informe-de-energias-renovables/sol/potencia-instalada/solar-termica-solpotencia>. [Último acceso: 21 Julio 2025].
- [21] R. E. d. E. (REE), «REE,» Enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.sistemaelectricoree.es/es/informe-de-energias-renovables/sol/generacion/solar-termica-solgeneracion>. [Último acceso: 21 Julio 2025].
- [22] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE); Asociación Española de la Industria Solar Térmica (ASIT), «IDAE,» 2021. [En línea]. Available: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/guiasolartermica_idae-asit_v3.0_20210111_nipo.pdf. [Último acceso: 2025 Julio 24].
- [23] A. d. E. d. E. R. (APPA), «APPA,» [En línea]. Available: <https://www.appa.es/appa-fotovoltaica/que-es-la-energia-fotovoltaica/>. [Último acceso: 25 Agosto 2025].
- [24] Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA), «Informe Anual del Autoconsumo Fotovoltaico 2024,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.appa.es/wp-content/uploads/2025/02/Informe-Autoconsumo-Fotovoltaico-2024.pdf>. [Último acceso: 25 Agosto 2025].
- [25] M. p. l. T. E. y. e. R. D. (MITECO), «MITECO,» [En línea]. [Último acceso: 26 Agosto 2025].
- [26] Endesa, «Endesa,» 26 Agosto 2025. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/luz-y-gas/autoconsumo-endesa/que-es-autoconsumo>.
- [27] Endesa, «Endesa,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/luz/energia-minieolica-y-como-puede-ayudarte-a-ahorrar>. [Último acceso: 15 Agosto 2025].
- [28] A. d. E. d. E. R. (APPA), «APPA,» [En línea]. Available: <https://www.appa.es/appa-autoconsumo/tecnologia-autoconsumo/>. [Último acceso: 15 Agosto 2025].
- [29] R. E. d. E. (REE), «REE,» Enero 2025. [En línea]. [Último acceso: 17 Agosto 2025].

- [30] (AEE), Asociación Eólica Española, «Anuario Eólico 2023,» 2023. [En línea]. Available: https://aeolica.org/wp-content/uploads/2023/07/AEE_ANUARIO-EOLICO_2023_LIBRO-DIGITAL.pdf. [Último acceso: 17 Agosto 2025].
- [31] T. U. O. D. (. y. W. B. GROUP, «Global Wind Atlas,» [En línea]. Available: <https://globalwindatlas.info/en/>. [Último acceso: Agosto 2025].
- [32] A. d. E. d. E. R. (APPA), «APPA,» [En línea]. Available: <https://www.appa.es/appa-biomasa/que-es-la-biomasa/>. [Último acceso: 18 Agosto 2025].
- [33] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «IDAE,» [En línea]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa>. [Último acceso: 20 Agosto 2025].
- [34] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «IDAE,» Abril 2025. [En línea]. Available: <https://informesweb.idae.es/biomasa/informe.php>. [Último acceso: 20 Agosto 2025].
- [35] A. A. d. l. Energía, «Agencia Andaluza de la Energía,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/energias-renovables/energia-de-la-biomasa>. [Último acceso: 18 Agosto 2025].
- [36] O. B. d. Galicia, «Observatorio Biomasa de Galicia,» [En línea]. Available: <http://www.observatoriobiomasa.gal/es/elige-tu-instalacion/sector-residencial>. [Último acceso: 20 Agosto 2025].
- [37] M. a. B. Singh, M. Z. Rahman y N. M. Nor, «Photovoltaics Performance Evaluation Using IoT Technology,» de *2022 International Conference on Future Trends in Smart Communities (ICFTSC)*, 2022.
- [38] P. Kanchan, A. K. Singh y N. Guruprasad, «Revolutionizing Renewable Sources of Energy using IoT: Impact and Challenges,» de *2023 International Conference on IoT, Communication and Automation Technology (ICICAT)*, 2023.
- [39] K. R. Challa, S. K. Sahoo y F. F. Yanine, «Demand Response for Renewable Generation in an IoT based Intelligent Smart Energy Management System,» de *2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 2021.
- [40] Instituto Nacional de Estadística (INE), «INEbase,» 2020. [En línea]. Available: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176952&menu=ultiDatos&idp=1254735572981. [Último acceso: 27 Septiembre 2025].
- [41] Endesa, «Endesa,» [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/luz/que-potencia-electrica-necesitas>. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [42] Naturgy, «Naturgy,» [En línea]. Available: https://www.naturgy.es/blog/hogar/coeficiente_de_simultaneidad. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [43] S. Solar, «Supermercado Solar,» 2025. [En línea]. Available: <https://supermercadosolar.es/content/48-compara-los-mejores-paneles-solares-de-2025?srsltid=AfmBOooaq0MQoJ-zW3tMa4MHBCYfRUsEafFdAicrsgebSg-B9DKjjuR>. [Último acceso: 20 Octubre 2025].
- [44] K. Mertens, *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2014.

- [45] BloombergNEF (BNEF), «PV Module Maker Tiering System,» BloombergNEF, 2025.
- [46] BloombergNEF (BNEF), «PV Module Maker Tiering System,» BloombergNEF, 2024.
- [47] S. Würzner, M. D. J. P. K. Helling y M. R. M. N. R. Schramme, «Development of a Smart Meter Based Data Interface for Energy Management Systems in the Manufacturing Industry,» 11 Marzo 2005. [En línea]. Available: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/d5768f0b-193b-44d9-9bc8-84b684071fd4/content>.
- [48] BloombergNEF, «El Almacén Fotovoltaico,» 2025. [En línea]. Available: <https://elalmacenfotovoltaico.com/es/blog/detail/lista-tier-1-inversores-fotovoltaicos-bloomberg-nef-q2-2025-analisis-exhaustivo.html?srsItd=AfmBOopzITicURCy4gNDVBHKrkfKhHFZdxQsx9UBylDyS1iNPerTCh4t>. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [49] A. C. f. a. E.-E. E. (ACEEE), «Energy Impacts of Smart Home Technologies,» Washington DC, 2018.
- [50] U. D. o. E. (. d. E. d. I. E. UU.), «Wireless Occupancy Sensors for Lighting Controls: An Applications Guide for Federal Facility Managers,» Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (Parte del DOE), Washington D.C., 2015.
- [51] M. Soheilian, G. Fischl y M. Aries, «Smart Lighting Application for Energy Saving and User Well-Being in the Residential Environment,» 2021.
- [52] IKEA, «IKEA,» [En línea]. Available: https://www.ikea.com/es/es/p/solhetta-bombilla-led-e27-806-lumenes-regulacion-intensidad-luminosa-forma-globo-blanco-opalo-60583924/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=IKEA_ES_Shopping_Generic_HFB10_Lighting_0_Google&gclid=aw.ds&gad_source=1&g. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [53] Amazon, «Amazon,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Aigostar-inteligente-Downlight-compatible-3000-6500K/dp/B09S2YNQN3/ref=asc_df_B09S2YNQN3?mcid=fcd304dcb3713b779087c9339d634018&t_ag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=699815759180&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=11658321715689388033&hvpone=&hvp.
- [54] Amazon, «Amazon,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/LED-3000K-6500K-Dormitorios-Habitaciones-Infantiles/dp/B0DHRX4CJZ/ref=asc_df_B0DHRX4CJZ?mcid=4f61e739f0193962b2c824283f6cf8fa&t_ag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=715928743897&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=13864303857303278280&hvpone=&hvp.
- [55] EfectoLED, «EfectoLED,» [En línea]. Available: https://www.efectoled.com/es/comprar-luz-led-con-sensor-de-movimiento/500-sensor-de-movimiento-pir-180o.html?gad_campaignid=17412475155&gad_source=1&gbraid=0AAAAADM8HxPsHN1DMks-dzIQ1H7VqlXZ2&gclid=Cj0KCQiA_8TJBhDNARIsAPX5qxQjFr5ya-IGFk4tUMolzQmNuAicNLCh-8. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [56] G. Del Campo, «Cómo ahorrar en la factura eléctrica con el Internet de las Cosas,» *Revista ambienta (MITECO)*, 2022.

- [57] A. Alanezi, K. P. Hallinan y R. Elhashmi, «Using Smart-WiFi Thermostat Data to Improve Prediction of Residential Energy Consumption and Estimation of Savings,» *Energies*, vol. 14, 2021.
- [58] Leroy Merlin, «Leroy Merlin,» [En línea]. Available: <https://www.leroymerlin.es/productos/termostato-inteligente-netatmo-17358033.html>. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [59] P. Componentes, «PC Componentes,» [En línea]. Available: https://www.pccomponentes.com/shelly-plug-s-mtr-gen3-enchufe-inteligente-wifi-y-bluetooth-medidor-de-consumo-blanco?utm_source=982195&utm_medium=afi&utm_campaign=www.bing.com&sv1=affiliate&sv_campaign_id=982195&awc=20982_1764956296_f3cc92dbe89a34c1b91a5f5. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [60] M. Markt, «Media Markt,» [En línea]. Available: https://www.mediamarkt.es/es/product/_regleta-tp-link-tapo-p300-2300-w-3-salidas-ac-type-f-cee-74-inalambrico-y-alambrico-blanco-1548045.html?tduid=49fd89e449c97700cea10c75734dfd50&utm_source=tradedoubler&utm_medium=aff-content&utm_content=3048432&utm_cam. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [61] C. N. d. I. M. y. I. C. (CNMC), «CNMC,» 2022. [En línea]. Available: https://www.cnmc.es/sites/default/files/editor_contenidos/Gu%C3%ADa%20Informativa%20Consumidores%20Electricidad-enero%202022%20FINAL%20links.pdf. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [62] J. d. Estado, «Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética,» Boletín Oficial del Estado (BOE), 2021.
- [63] MITECO, «MITECO,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/energia-electrica/electricidad/peajes.html>. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [64] Red Eléctrica de España (REE), «Red Eléctrica de España (REE),» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/operacion/sistema-electrico/pvpc>. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [65] Red Eléctrica de España (REE), «Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC),» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/operacion/sistema-electrico/pvpc>. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [66] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Entra en vigor la nueva metodología de cálculo de la tarifa regulada de la electricidad,» 29 Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2023/12/entra-en-vigor-la-nueva-metodologia-de-calculo-de-la-tarifa-regu.html>. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [67] CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), «Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources,» CIGRÉ, París, 2014.
- [68] J. d. Estado, «Real Decreto-ley 10/2022, de 13 de mayo, por el que se establece con carácter temporal un mecanismo de ajuste de costes de producción para la reducción del precio de la electricidad en el mercado mayorista,» Madrid, 2022.
- [69] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), «Blog CNMC,» 19 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://blog.cnmc.es/2022/09/19/el-impacto-del-mecanismo-del-tope-del-gas-en-las-facturas-de-electricidad/>. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [70] M. p. I. T. E. y. e. R. D. (MITECO), «Pobreza Energética,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/pobreza-energetica/pe-001/requisitos.html>. [Último acceso: Noviembre 2025].

- [71] J. Rodríguez Franco, E. C. Rodríguez Jiménez y A. I. Pierdant Rodríguez, «Análisis de proyectos de inversión,» de *Matemáticas financieras*, México D.F., Larousse - Grupo Editorial Patria, 2014, pp. 245-264.
- [72] Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), «Manual para la preparación de estudios de viabilidad industrial,» Naciones Unidas, Viena, 1978.
- [73] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «Informe de precios energéticos regulados,» IDAE, Madrid, 2025.
- [74] A. d. G. d. España, «administracion.gob,» [En línea]. Available: https://administracion.gob.es/pag_Home/Tu-espacio-europeo/derechos-obligaciones/empresas/impuestos/especiales/electricidad.html. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [75] Huawei, «Huawei Solar,» [En línea]. Available: <https://solar.huawei.com/es/products/SUN2000-3-368-4-46-5-6K-LB0/support/>. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [76] Huawei, «Huawei Solar,» [En línea]. Available: <https://solar.huawei.com/download?p=%2f-%2fmedia%2fSolarV4%2fsolar-version%2feurope%2fes%2fprofessionals%2fall-products%2fresidential%2fsmart-energy-controller%2fSUN2000-3-4-5-6-8-10KTL-M1-Version-de-alta-corriente%2fSUN2000-3-4-5-6-8-10KTL-M1-Version-de>. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [77] Atersa, «Atersa,» [En línea]. Available: <https://atersa.shop/cuanto-cuesta-instalar-placas-solares/#:~:text=de%20paneles%20solares!-,Coste%20de%20los%20paneles%20solares,vamos%20a%20ver%20a%20continuaci%C3%B3n>. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [78] Tienda Solar, «Tienda Solar,» [En línea]. Available: <https://tienda-solar.es/paneles-solares/1674-ja-solar-mono-perc-565w-bifacial-silver-frame?srsId=AfmBOopjSgfTmhlzZYuRPAxhbJzHJx3HbMT-5w9bg1yEy-DTByDiYPAc>. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [79] Ecofener, «Ecofener,» [En línea]. Available: https://ecofener.com/inversores-a-red/1980-inversor-hibrido-huawei-sun2000-368ktl-11-de-3680w-que-se-puede-usar-con-bateria-de-litio-lg-o-huawei.html?gad_source=1&gad_campaignid=22809519091&gbraid=0AAAAADuUWbiS2SP79Ny3yy0SEBDhb6UIG&gclid=Cj0KCQiAubrJBhCbA. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [80] AutoSolar, «AutoSolar,» [En línea]. Available: https://autosolar.es/kits-solares-conexion-red/kit-paneles-solares-autoconsumo-fotovoltaico-huawei-3000w?gclid=aw.ds&gad_source=1&gad_campaignid=21834415124&gbraid=0AAAAADrku1LjqfF-3Z56dqx55j7A72Mjr&gclid=CjwKCAiAxc_JBhA2EiwAFVs7XCAR_ZNNCM_499H39whjymLjU. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [81] B. d. E. (BDE), «Banco de España,» Junio 2025. [En línea]. Available: <https://www.bde.es/wbe/es/noticias-eventos/actualidad-bce/el-bce-baja-los-tipos-xx-puntos-basicos-en-junio.html#:~:text=El%20Consejo%20de%20Gobierno%20ha,11%20de%20junio%20de%202025.&text=Your%20browser%20can't%20play%20this%20video.&text=An%20error%20occ>. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [82] P. K. B. T. S. B. y. M. B. Sarasij Adhikary, «Bidirectional operation of electric vehicle charger incorporating grids and home energy storage: V2G/G2V/V2H/V2X for sustainable development,» de *Renewable Energy for Plug-In Electric Vehicles.*, M. R. N. R. y. D. S. Rao., Ed., Elsevier., 2024.
- [83] I. p. l. D. y. A. d. l. E. (IDAE), «IDAE,» 2024. [En línea]. Available:

https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/NIPO-629-24-002-4_GUIA_05_PASOS-CONVERTIRSE-EN-AUTOCONSUMIDOR.pdf. [Último acceso: 2025 Agosto 8].

- [84] P. P. Phillips y J. J. Phillips, ROI Basics, Second Edition, Alexandria, VA: Association for Talent Development (ATD), 2019.
- [85] (CNMC), Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, «Informe sobre la propuesta del operador del sistema de revisión de los perfiles de consumo (ID: 5090323),» 2024.
- [86] Leroy Merlin, «Leroy Merlin,» Diciembre 2025. [En línea]. Available: https://www.leroymerlin.es/productos/inversor-hibrido-monofasico-huawei-sun2000-5-kw-87962814.html?highlightedOfferCode=aba42205a82c2c5b8e35d82a34b18704bdfff2d4&gclsrc=aw.ds&&utm_medium=cpc&utm_source=google-shopping&utm_campaign=lmes_conversion_ao_perfor.
- [87] Leroy Merlin, «Leroy Merlin,» [En línea]. Available: https://www.leroymerlin.es/productos/inversor-hibrido-trifasico-huawei-sun2000-m1-hc-3f-8ktl-as-92477462.html?highlightedOfferCode=8cf179eff77bc02e89e2c1c14187e80a397e379b&gclsrc=aw.ds&&utm_medium=cpc&utm_source=google-shopping&utm_campaign=lmes_conversion_ao_perfor. [Último acceso: Diciembre 2025].

