TRANSFORMANDO EL HOGAR

Viabilidad técnica y económica de una vivienda off-grid

TFM

02 - 11 - 2025

Autores:

Alonso Mayorga Salas

Santiago Luquez

Santiago Pastrana Ramírez

Carlos Elías Urrego Arboleda

Oscar Orlando Bolañoz Muñoz

Tutor:

Alejandro Lara Hidalgo

Máster Universitario En Energías Renovables

Universidad Europea CANARIAS

Universidad Europea CANARIAS

Tabla de contenido

RESUMEN **1**
ABSTRACT **1**
1. INTRODUCCIÓN **1**
2. ANTECEDENTES **1**
3. MARCO TEÓRICO **4**
3.1. Contexto internacional **4**
3.2. Energías renovables **4**
4. Objeto de estudio **7**
5. OBJETIVOS **7**
5.1. Objetivo General **7**
5.2. Objetivos Específicos **7**
5.2.1. Aspectos clave del proyecto 8
5.2.2. Aportes de valor añadido en el proyecto 8
6. HIPÓTESIS DEL TRABAJO **9**
6.1. Escenario Reactivo vs Proactivo **10**
7. ESTADO DE LA CUESTIÓN **12**
8. CORPUS / FUENTES / MATERIALES OBJETO DE ANÁLISIS **12**
9. DATOS DE PARTIDA **13**
9.1. Selección de emplazamiento **13**
9.2. Características de la vivienda **13**
9.3. Horizonte temporal del estudio **14**
9.4. Consumos energéticos de referencia **14**
9.5. Recursos disponibles **15**
9.6. Flujo de trabajo **15**
10. METODOLOGÍA Y PROCESO DE REDACCIÓN DEL TFM **16**
10.1. Enfoque del análisis **16**
10.2. Methodology **17**
11. ESTUDIO URBANO / PAISAJÍSTICO CON JUSTIFICACIÓN NORMATIVA **17**
12. CÁLCULO NECESIDADES ENERGÉTICAS DE ZONA DE IMPLANTACIÓN Y DÉFICIT DE EERR. **18**
13. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA **18**
13.1. Generadores fotovoltaicos 18
13.2. Almacenamiento energético (baterías) 19
Cálculos de producción y almacenamiento **20**
13.3. Producción fotovoltaica 21
13.4. Dimensionamiento del sistema de almacenamiento 21
13.5. Dimensionamiento del inversor 22
14. Necesidad y consumo energético **22**
14.1. Electricidad y Calefacción 23
14.2. Recurso Hídrico 23
14.3. Escenarios de consumo energético 27
14.4. Análisis Estacional del Consumo: Verano vs. Invierno 32
15. Configuración del sistema **34**
15.1. Concepto arquitectónico 3D de la vivienda autosuficiente 34
15.2. Garaje modular como núcleo operativo 35
16. Operación y mantenimiento **37**
16.1. Estrategia de operación 38
16.2. Mantenimiento preventivo 38
16.3. Mantenimiento correctivo. 38
16.4. Costes de operación y mantenimiento 39
16.5. Tablero interactivo 39
16.6. Integración de los datos 40
16.6.1. Recurso Solar 40
16.6.2. Recurso Hídrico 40
16.6.3. Consumo Eléctrico 40
16.6.4. Sistema de Almacenamiento 40
16.6.5. Estado actual de la vivienda 41

16.6.6. Diseño del tablero 41
16.6.7. Aspectos técnicos del desarrollo del tablero 42
16.6.8. Técnicas más relevantes utilizadas 42
16.7. Adaptabilidad a cambios en la ocupación de la vivienda 43
16.8. Estrategias de eficiencia energética para la reducción de la demanda 43
16.9. Estrategias clave: 44
16.10. Modo de operación en estado de emergencia 44
17. Evaluación económica (inversión, financiación, flujos de caja, rentabilidad) 45
17.1. Costes de operación y mantenimiento 47
17.2. Financiación del proyecto 47
17.3. Flujos de caja 47
17.4. Conclusiones económicas 48
17.5. Visualizaciones del análisis económico comparativo a 25 años, incluyendo inversión inicial, retorno, ahorro y escenarios 48
18. Análisis DAFO 50
19. Resultados 50
20. Comparación entre hipótesis y resultados 51
21. Justificación del porcentaje de transformación de energías convencionales a energías renovables conseguido 52
22. Consideraciones finales 53
22.1. Final considerations 54
23. Futuras líneas de investigación y mejoras en la vivienda 54
24. Bibliografía 56

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster investiga la factibilidad técnica, económica y ecológica de una vivienda autónoma (off-grid), capaz de funcionar sin la red eléctrica, todo esto usando energía solar fotovoltaica, almacenando en baterías, y gestionando inteligentemente el consumo de energía.
En un estudio particular en Jaén, España, se dimensionó el sistema, examinando el coste, y se valoró ambientalmente el modelo. Los resultados muestran que la vivienda logra una autonomía energética sobre el 95 %, un ahorro del 70 % en costos, al compararla con una vivienda normal, y una enorme disminución del 90 % en emisiones de CO_2.

Además, el estudio señala que la combinación de energías renovables, la digitalización y el control predictivo ayuda a lograr un modelo de vivienda sostenible, eficiente, y económicamente factible.
Finalmente, se sugieren caminos de investigación futuros, como implementar aerotermia, y otros métodos enfocados en la unión de la inteligencia artificial y materiales de almacenamiento novedosos. El análisis del ciclo de vida de los componentes también es central.

Palabras clave: Energías renovables;Vivienda *off-grid* ;Eficiencia energética;Sostenibilidad;Energía Fotovoltaica;Aerotermia;Autonomía energética;Gestión inteligente.

ABSTRACT

This Master's Thesis explores the technical, economic, and environmental feasibility of a fully off-grid residential dwelling, designed to operate independently from the electrical grid by integrating solar photovoltaic generation, battery storage, and smart energy management.

This study, conducted in Jaén (Spain), includes the system design, economic assessment, and environmental analysis. Results indicate that the proposed configuration achieves an energy autonomy of over 95%, a 70% reduction in lifetime energy costs, and a 90% decrease in CO_2 emissions compared to a conventional grid-connected home.

Finally, the findings confirm that the combination of renewable technologies, digitalization, and predictive control enables a sustainable and economically competitive housing model. Additionally, future research directions include artificial intelligence optimization, advanced energy storage materials, and life-cycle assessment (LCA) of system components.

Keywords: Renewable energy (RE); Off-grid residential building; Energy efficiency; Sustainability; Solar photovoltaics (PV); Air-source heat pump (ASHP); Energy self-sufficiency; Smart energy management.

1. INTRODUCCIÓN

En la coyuntura actual de transición energética y la creciente preocupación por la sostenibilidad, el desarrollo de viviendas autosuficientes se presenta como una solución integral frente a los desafíos ambientales, económicos y sociales presentes. La dependencia de fuentes fósiles, el aumento en los costos energéticos y la urgencia por reducir las emisiones de carbono impulsan la adopción de modelos habitacionales basados en energías limpias y tecnologías inteligentes.

Este proyecto propone el diseño y la implementación de una vivienda autosuficiente que integra un sistema fotovoltaico híbrido (combina la energía solar con almacenamiento avanzado en baterías) y un garaje modular inteligente que actúa como micro-central energética para garantizar un suministro de energía constante y más seguro. Esta infraestructura no solo garantiza la autonomía eléctrica de la vivienda, sino que también optimiza la gestión de la energía generada mediante control automatizado, priorizando el autoconsumo, la eficiencia energética.

Además de reducir la huella de carbono y la dependencia energética externa, el proyecto busca demostrar la viabilidad técnica y económica de un modelo replicable y escalable que combine diseño arquitectónico eficiente, energías renovables, inteligencia artificial para gestión energética y materiales sostenibles. En conjunto, estos elementos definen una nueva generación de viviendas preparadas para los retos energéticos y climáticos del futuro.

2. ANTECEDENTES

Diversos estudios recientes han abordado el análisis técnico y económico de sistemas fotovoltaicos aplicados a viviendas, comparando configuraciones conectadas a red (on-grid) y aisladas (off-grid). Por ejemplo, Romero (Romero Vargas, 2020) desarrolló un estudio comparativo entre un sistema fotovoltaico autónomo y otro conectado a red en la ciudad de Lambayeque (Perú), con el objetivo de cuantificar los beneficios económicos y ambientales de ambas opciones. El autor concluyó que, aunque el sistema off-grid ofrece independencia energética, su viabilidad económica es limitada debido al elevado coste inicial y a la necesidad de almacenamiento en baterías, siendo el sistema on-grid más rentable para entornos urbanos.

Otro trabajo relevante en el ámbito de los sistemas fotovoltaicos es el desarrollado por Álvarez y Ojeda ((Alvarez Yana & Ojeda Aguilar, 2023)), quienes diseñaron un aplicativo de cálculo automatizado para optimizar los costos de instalación de sistemas solares fotovoltaicos en el Perú. Su investigación surgió ante la dificultad que presentan los programas de simulación especializados(que

requieren formación técnica avanzada), proponiendo una herramienta accesible que facilite la estimación del dimensionamiento y del coste total de instalación para configuraciones *off-grid* y *on-grid*.

El estudio se basó en datos de irradiación solar obtenidos de fuentes oficiales (NASA, SOLARGIS, Google Earth y SENAMHI), alcanzando valores promedio de 5,9 a 6,0 kWh/m²·día, propios de la zona costera peruana.
El aplicativo fue desarrollado en LabVIEW, utilizando una arquitectura de máquina de estados y programación orientada a eventos, lo que permitió optimizar el uso de recursos informáticos y reducir el tiempo de cálculo. Los resultados demostraron una mejora significativa en la eficiencia de diseño y un ahorro de hasta un 12 % en el uso de CPU y 552,7 soles en los costos de dimensionamiento de equipos, en comparación con metodologías convencionales.

El estudio realizado por Pérez (Bello Pérez, 2025) se centra en la optimización energética y el desarrollo de un sistema de control inteligente para la gestión de agua caliente sanitaria (ACS) y climatización en una vivienda de alta eficiencia ubicada en el norte de Tenerife.
El objetivo principal del trabajo fue reducir el consumo energético mediante la integración de energías renovables y la automatización de los sistemas térmicos. Para ello, se llevó a cabo un modelado tridimensional de la vivienda y una simulación energética detallada, considerando las condiciones climáticas locales y los materiales constructivos del edificio.

El autor diseñó un algoritmo de control domótico capaz de priorizar el uso de la energía fotovoltaica disponible para alimentar los sistemas de climatización y producción de ACS, reduciendo así la dependencia de la red eléctrica.
El resultado fue un sistema que mejora la eficiencia global del edificio al optimizar el uso de excedentes energéticos y sincronizar los consumos con los períodos de mayor generación solar.

El presente proyecto toma como referencia los avances de Pérez (2025) en cuanto a la gestión inteligente de energía, pero los amplía al proponer un modelo integral de vivienda totalmente autosuficiente (off-grid).
Mientras Pérez se centra en la optimización térmica dentro de una vivienda conectada a la red, este trabajo incorpora la generación fotovoltaica, el almacenamiento en baterías, la aerotermia y el control inteligente como un sistema unificado que permite la independencia total del suministro eléctrico externo.

El trabajo desarrollado por Castellanos (Castellanos Contreras, 2025) plantea el diseño de un modelo inteligente de generación eléctrica aplicado a redes híbridas de energía renovable no convencional, con el propósito de optimizar la gestión y previsión energética en función de las condiciones locales.

La investigación se basa en la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, concretamente mediante Redes de Petri y modelos matemáticos estocásticos, para predecir el comportamiento energético de sistemas híbridos y determinar su viabilidad técnica bajo diferentes escenarios de operación.

El trabajo desarrollado por Rodríguez (Saorín Rodriguez, 2025) analiza la viabilidad técnica y económica de una instalación solar fotovoltaica híbrida para autoconsumo, aplicada a un edificio residencial en Cartagena (España).
El estudio surge en un contexto de creciente vulnerabilidad del sistema eléctrico nacional, acentuada por fenómenos meteorológicos extremos, como la DANA que afectó a Valencia en 2024, y el apagón nacional ocurrido en abril de 2025.
Estos eventos, junto con los objetivos globales de transición energética y descarbonización, impulsaron la búsqueda de soluciones locales que integren autonomía, eficiencia y sostenibilidad.

El autor plantea una instalación fotovoltaica híbrida equipada con baterías, inversores híbridos y sistemas de respaldo (BackUp Box), analizando diferentes modos de operación (autoconsumo, vertido a red y funcionamiento en respaldo).
A través de un modelo de simulación desarrollado en MATLAB, se evalúa el comportamiento del sistema durante un ciclo de 24 horas, considerando generación, consumo, carga y descarga de baterías e interacción con la red eléctrica.

El estudio de Kristian Kigen (Kigen, 2025) , desarrollado en la Universidad Jiao Tong de Shanghái (SJTU), presenta el diseño y optimización de un sistema híbrido de energía renovable (HRES) aplicado a una microvivienda autosuficiente.
El trabajo integra tres tecnologías clave: un sistema fotovoltaico (PV), un sistema de almacenamiento en baterías (BESS) y un recolector de agua atmosférica (AWH), con el objetivo de abordar de manera simultánea los retos de acceso a energía limpia y agua potable en entornos residenciales fuera de la red eléctrica (*off-grid*).

El modelo combina datos reales obtenidos de la micro-casa experimental con simulaciones energéticas en Python, evaluando tres configuraciones diferentes en función del nivel de aislamiento térmico del edificio como la vivienda real existente (MH) en el campus de la SJTU, la variante basada en la norma GB50189 (estándar chino de construcción sostenible) y La variante TEK17, correspondiente al estándar noruego de alta eficiencia energética.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Contexto internacional

La dependencia mundial en el petróleo, el carbón, el gas natural y aun en los combustibles nucleares, como recursos fósiles disponibles en cantidades que pueden ser consideradas relativamente abundantes pero finitas, y las coyunturas económicas y geopolíticas asociadas, con su distribución geográfica y su dominio, han generado en muchos países la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, que a su vez contribuyan a la reducción de emisiones de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático que viene experimentando el planeta.

Aproximadamente el 82% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles, mientras que el 18% restante proviene de fuentes renovables con un crecimiento continuo. Dada la disponibilidad de al menos una de las fuentes renovables anteriormente mencionadas en cualquier posición geográfica del planeta, y la abundancia relativa de una o varias de estas fuentes en algunas regiones favorecidas, las fuentes de energía renovables representan a su vez inmensos potenciales energéticos para ser aprovechados de una manera costo-efectiva en la medida en que su investigación, su desarrollo y el despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha venido sucediendo en los últimos 40 años.

3.2. Energías renovables

Se denomina “energías renovables” a aquellas fuentes energéticas basadas en la utilización del sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal (entre otras). Se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles (como sucede con las energías convencionales), sino recursos capaces de renovarse ilimitadamente. Su impacto ambiental es de menor magnitud dado que además de no emplear recursos finitos, no generan contaminantes. Sus beneficios van desde la diversificación de la matriz energética de un país hasta el fomento de su industria nacional, producir cada vez más energía renovable y abandonar las fuentes convencionales es una necesidad que comparten todos los países del mundo.

El crecimiento de las energías renovables es imparable, como reflejan las estadísticas anuales de la Agencia Internacional de la Energía (AIE). En 2024, el 80% del aumento de la generación eléctrica mundial lo aportaron fuentes de bajas emisiones (renovables y nuclear) y, según la AIE, en 2025-2027 todo el incremento de la demanda estará cubierto por estas tecnologías (International Energy Agency (IEA), 2025) (International Energy Agency (IEA), 2025). La electricidad limpia alcanzó el 40,9% del mix mundial en 2024, consolidando la tendencia en 2025 (Ember, 2025) . La energía solar fotovoltaica es el pilar de esta expansión: representó más de tres cuartas partes de las nuevas adiciones renovables en 2024 y se espera que aporte ~80% del crecimiento de la capacidad renovable entre 2024 y 2030 (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2025). En costes, los precios de los módulos FV cayeron de forma acusada en 2023-2024 y se estabilizaron en 2025; en eólica, los costes de componentes bajan en 2025 y los precios de turbinas descienden en China, mientras que en otros mercados siguen altos frente a 2020 (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), 2025) .

En los últimos años, el desarrollo de las tecnologías asociadas a la transformación de energías renovables ha sorprendido de manera sostenida a los analistas internacionales en materia de la velocidad y la rata con la que sus costos han venido reduciéndose, especialmente en el caso de la energía solar FV.

A continuación, un desglose aproximado de la electricidad mundial proveniente de fuentes renovables por tipo, según estimaciones recientes:



Figura 1. Electricidad Mundial provenientes de fuentes renovables - Fuente: Realización propia con datos de la IAE.

3.2.1. Energía Solar

Este tipo de energía renovable consiste en aprovechar la radiación electromagnética procedente del sol mediante células fotovoltaicas, colectores solares o heliostatos. La propia energía solar puede ser fotovoltaica o térmica. La diferencia es que la energía solar fotovoltaica produce directamente electricidad a partir de la radiación solar. Mientras que la térmica consiste en aprovechar la energía solar para producir calor.

3.2.2. Tecnología a utilizar como base para nuestro proyecto

El desarrollo de este proyecto se enfoca en la producción de energía fotovoltaica (conversión de luz solar en electricidad).

3.2.3. Energía Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica captura la luz solar con los paneles solares y la convierte en electricidad de corriente continua (CC) de forma directa por el efecto fotoeléctrico. Luego, un inversor la transforma en corriente alterna, para alimentar hogares o edificios y devolver el exceso de electricidad a la red, en el caso de los sistemas conectados a red.

3.2.4. El efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico (FV) es el principio por el que una célula convierte la luz en electricidad: la radiación solar trae fotones de distinta energía que, al incidir en la célula, pueden reflejarse, atravesarla o ser absorbidos; solo estos últimos generan electricidad porque transfieren su energía a electrones del semiconductor. Como el material está dopado en dos capas (p y n), se crea un campo eléctrico interno que separa cargas y guía los electrones hacia los contactos, de modo que, al cerrar el circuito, fluye corriente.

Varias células interconectadas y encapsuladas forman un módulo fotovoltaico que entrega corriente continua; combinando módulos en serie y paralelo se ajustan tensión y corriente del generador FV. El encapsulado y la estructura protegen frente al ambiente, aportando durabilidad y fiabilidad. Para que el sistema haga un trabajo útil (p. ej., bombear agua o alimentar una vivienda, también de noche) se necesita el resto del sistema (BOS): inversor, reguladores/control, almacenamiento cuando aplica, protecciones y cableado, dimensionados según la aplicación y la irradiación disponible (U.S. Department of Energy, Solar Energy Technologies Office (SETO), s.f.).

3.2.5. Sistemas fotovoltaicos off-grid

Un sistema fotovoltaico off-grid (o "fuera de la red") es un sistema de energía solar autónomo que funciona de manera independiente de la red eléctrica convencional, utilizando paneles solares, un regulador de carga, un inversor y un banco de baterías para almacenar la energía y proveer electricidad en ubicaciones remotas o donde hay cortes frecuentes de luz. La energía se produce y se gestiona de forma eficiente, y las baterías permiten suministrar electricidad durante la noche o cuando no hay sol.

4. Objeto de estudio

Este proyecto tiene por objetivo el estudio de una vivienda autosuficiente energéticamente (off-grid) en el contexto de España, determinando la dirección y alcance del estudio, y evaluando su viabilidad técnica, económica, ambiental y arquitectónica. El estudio contempla el diseño y la implementación de un sistema de suministro alternativo (no convencional) para una vivienda residencial tipo, comenzando desde el sistema de recolección de energía, el sistema de almacenamiento, además de una herramienta que permita obtener información de consumo energético de la vivienda en tiempo real, incorporando además criterios de eficiencia y diseño sustentable.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Diseñar y evaluar, mediante simulaciones técnicas y análisis multicriterio, la viabilidad técnica, económica, ambiental y operativa de un prototipo de vivienda autosuficiente, adaptado al contexto español. El diseño integra sistemas de generación renovable, almacenamiento avanzado de baterías y tecnologías de gestión inteligente. Finalmente, se evalúa el desempeño frente a modelos convencionales conectados a la red, considerando indicadores claves y recomendaciones a futuro.

5.2. Objetivos Específicos

- Diseñar y dimensionar un sistema off-grid que integre generación renovable, almacenamiento, gestión hídrica autónoma y garaje modular como núcleo operativo.
- Desarrollar e implementar una micro-central con algoritmos predictivos y modos de operación adaptativos para gestión en tiempo real, emergencias y cambios de ocupación.
- Valorar con fines orientativos los ahorros en factura y el periodo simple de recuperación del sistema frente a la alternativa conectada a red en un horizonte de 25 años, con base en datos reales (consumo, tarifas eléctricas y degradación de los equipos).Evaluar la sostenibilidad

ambiental del sistema e identificar alianzas estratégicas que favorezcan su desarrollo e implementación.

5.2.1. Aspectos clave del proyecto

Micro-central energética con soporte de inteligencia artificial

El sistema central de gestión energética analiza en tiempo real el consumo de la vivienda y utiliza previsiones meteorológicas de hasta dos semanas para proyectar la disponibilidad futura de recursos renovables. Con esta información, genera escenarios óptimos de consumo, buscando maximizar la eficiencia y evitar déficits energéticos.

Modo de operación en estado de emergencia

En caso de que las previsiones meteorológicas anticipen varios días consecutivos de baja generación (por nubosidad o ausencia de viento), el sistema activa un protocolo de ahorro. Este modo reducirá automáticamente el uso de iluminación, calefacción, consumo de agua y otros, prolongando la autonomía energética de una semana hasta aproximadamente un mes.

Adaptabilidad a cambios en la ocupación de la vivienda

El sistema es capaz de identificar aumentos de demanda energética ocasionados por la llegada de visitas u otros cambios en la ocupación (por ejemplo, pasar de cuatro a siete personas). Con esta información, recalculará los escenarios de consumo y ajuste de recursos para mantener la estabilidad del sistema sin comprometer el confort de los usuarios.

Gestión autónoma del recurso hídrico

La vivienda cuenta con un pozo de agua propio. Mediante el uso de energía solar, y aprovechando los excedentes de generación renovable, se bombea agua hacia un tanque de reserva para garantizar el suministro doméstico de la vivienda.

Garaje modular como núcleo operativo

Aunque la arquitectura de la vivienda es independiente del diseño energético, el garaje se plantea como el núcleo operativo del sistema. Su estructura modular aloja el conjunto de baterías (en stack vertical), el tablero de control con inteligencia artificial y demás equipos asociados.

5.2.2. Aportes de valor añadido en el proyecto

- Render (maqueta3D) del concepto de la vivienda incluido en el documento, con enlace a visualización 3D interactiva en una plataforma externa (recorrido virtual).

- Desarrollo de un tablero inteligente, con imágenes integradas en el trabajo, y enlace a una versión web funcionando en tiempo real.
- Planos técnicos de la vivienda y del garaje/micro-central.
- Gráficos e infografías comparativas, flujos de energía, y funcionamiento del sistema.
- Visualizaciones del análisis económico comparativo a 25 años, incluyendo inversión inicial, retorno, ahorro y escenarios.

6. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

La hipótesis central de este trabajo y concepto es que una vivienda unifamiliar puede alcanzar un grado elevado de autosuficiencia energética y resiliencia operando totalmente fuera de la red eléctrica convencional, almacenamiento avanzado en baterías y un modelo de gestión inteligente basado en inteligencia artificial.

Este planteo, demuestra que, mediante el diseño de una micro-central energética modular alojada en el garaje de la vivienda, es posible no solo cubrir la totalidad de la demanda energética doméstica, sino también tener la flexibilidad para adaptarse a variaciones en el uso de la vivienda, gestionar emergencias energéticas (baja generación renovable) y optimizar el uso de recursos excedentes para bombeo y almacenamiento de agua.

También este modelo off-grid resultaría económicamente competitivo en un horizonte de 25 años, frente a una vivienda convencional conectada a la red, al considerar parámetros como el avance de la tecnología, ahorro energético, costo de la energía, el impacto ambiental y la independencia frente a la volatilidad del precio de la electricidad.

Por último, se intenta demostrar que el concepto de vivienda autosuficiente propuesto constituye una alternativa, sostenible y replicable, capaz de aportar alternativas frente a escenarios futuros de crisis energética y climática.

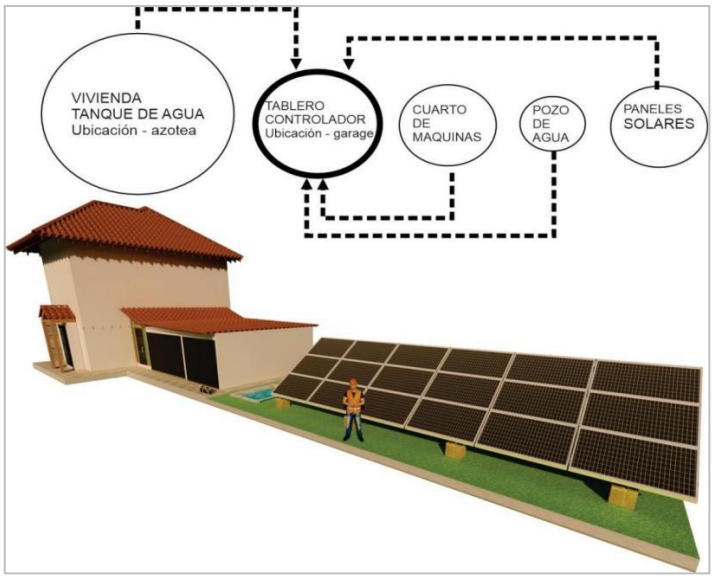


Figura 2. Esquema garaje modular como núcleo operativo de la vivienda off-grid - Fuente: Propia

6.1. Escenario Reactivo vs Proactivo

En este apartado se analizan dos posibles escenarios energéticos y estratégicos para una vivienda:

- Escenario Reactivo (conectado a la red): la vivienda mantiene su dependencia de los servicios convencionales de electricidad, gas y agua, asumiendo los riesgos relacionados a lo largo del tiempo. Para el caso de la electricidad, se ha considerado una tarifa inicial de 0,30 €/kWh en 2025, con un crecimiento proyectado de +3 % anual hasta 2050.

- Escenario Proactivo (off-grid): la vivienda incorpora sistemas de generación y almacenamiento propios (FV + baterías), lo que permite mitigar muchos de los riesgos asociados al escenario reactivo. Se ha considerado un coste nivelado de la electricidad (LCOE) inicial de 0,18 €/kWh en 2025, con una reducción proyectada de –2% anual hasta 2050, en línea con las previsiones de disminución de costes tecnológicos (paneles solares, inversores y baterías, etc.).

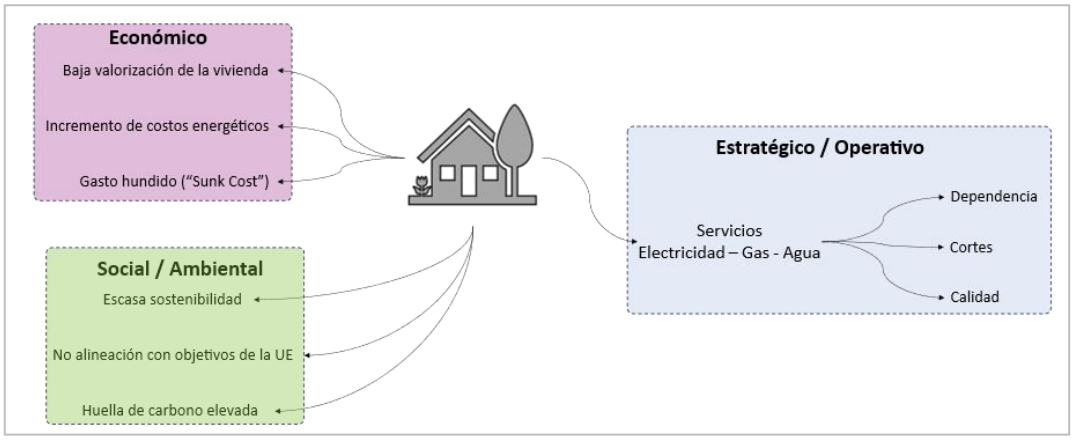


Figura 3. Escenario reactivo, aspectos y riesgos - Fuente: Propia

Se presenta un mapa de riesgos asociados a la vivienda en el escenario reactivo (conectada a la red de servicios). Los riesgos se agrupan en tres aspectos principales:

- Económicos: baja valorización de la vivienda, incremento de costes energéticos y gasto hundido.
- Sociales y ambientales: escasa sostenibilidad, falta de alineación con los objetivos de la UE y elevada huella de carbono.
- Estratégicos/operativos: dependencia de los servicios, vulnerabilidad a cortes y problemas de calidad en el suministro.

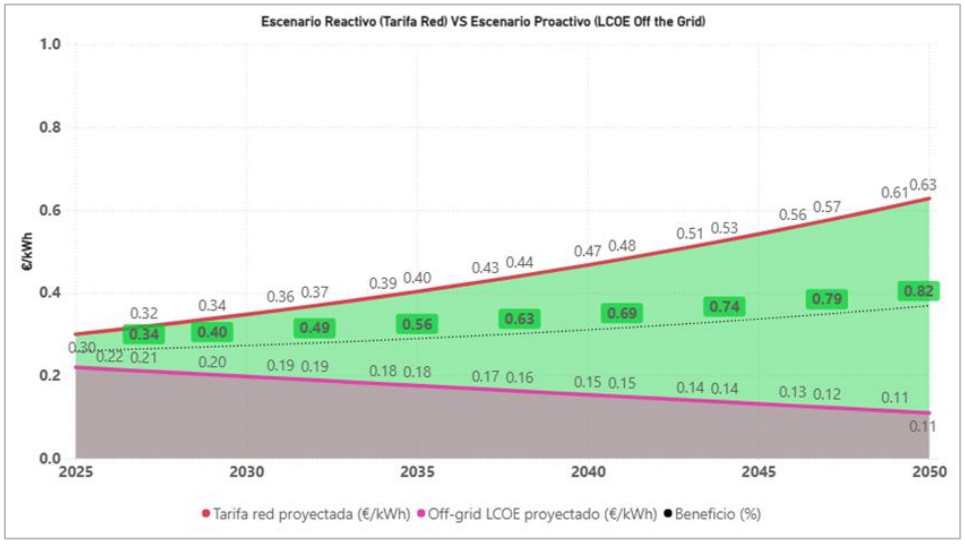


Figura 4. Proyección 2025–2050: Escenario Reactivo vs. Escenario Proactivo y Beneficio Económico - Fuente: Propia

Se compara la evolución proyectada de la tarifa eléctrica de una vivienda conectada a la red frente al LCOE residencial Off The Grid para un período de 25 años (2025–2050):

- La tarifa eléctrica parte de un promedio de 0,30 €/kWh en 2025 y crece un 3 % anual, alcanzando más de 0,60 €/kWh en 2050.
- El LCOE off-the-grid inicia en 0,18 €/kWh y disminuye un 2 % anual, reduciéndose hasta ~0,11 €/kWh en 2050.

La diferencia entre ambas curvas representa el beneficio económico neto, con valores moderados en el 2025 y superando el 80 % de ahorro relativo en 2050.

Es evidente que el escenario proactivo no solo disminuye los riesgos económicos asociados a la volatilidad de los precios de la energía, sino que también aporta un valor estratégico a la vivienda al convertirla en un activo resiliente y autónomo.

7. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La literatura reciente converge en que los sistemas híbridos off-grid ganan tracción por independencia energética, sostenibilidad y resiliencia; en Latinoamérica (Romero Vargas, 2020) se muestra que el on-grid es más rentable en urbano mientras el off-grid es viable en rural aislado, en Europa (Bello Pérez, 2025) se confirma que la gestión predictiva en viviendas eficientes reduce demanda y mejora confort, mientras otros estudios (Alvarez Yana & Ojeda Aguilar, 2023) evidencian el valor de las herramientas de dimensionamiento; a escala global, IRENA (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2025) y la Comisión Europea impulsan microredes domésticas, autoconsumo y almacenamiento, y trabajos como Rodríguez (Saorín Rodriguez, 2025) y Castellanos (Castellanos Contreras, 2025) apuntan a la rentabilidad y al potencial de modelos inteligentes; de forma complementaria, otros estudios (Kigen, 2025) ponen el foco en el diseño integral (aislamiento-dimensionamiento) para microviviendas autosuficientes.

No obstante, persisten vacíos en la integración conjunta de sistemas térmicos y eléctricos, en la evaluación simultánea técnico-económica-ambiental y en la validación práctica de modelos predictivos en viviendas reales; en consecuencia, este trabajo propone el diseño y análisis de una vivienda off-grid con FV, aerotermia y control inteligente, evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental en el horizonte 2025–2050, para contribuir a cerrar dichas brechas.

8. CORPUS / FUENTES / MATERIALES OBJETO DE ANÁLISIS

El trabajo se apoya en documentación técnica, normativa vigente y datos de sitio necesarios para el diseño y verificación del sistema híbrido propuesto en una vivienda off-grid.

El análisis técnico y de dimensionamiento del sistema se ha apoyado en fuentes y materiales de carácter práctico, que incluyen:

- Bases de datos meteorológicas de irradiación solar y temperatura media anual en Jaén (España), obtenidas del portal PVGIS y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).
- Fichas técnicas de equipos fotovoltaicos, inversores, bombas de calor aerotérmicas y sistemas de almacenamiento, suministradas por fabricantes de referencia (Huawei, Fronius, Panasonic, BYD, entre otros).

- Normativas españolas y europeas sobre instalaciones eléctricas y térmicas, entre ellas el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT, 2021), el Código Técnico de la Edificación (CTE, 2020) y las normas UNE-EN aplicables a módulos fotovoltaicos y bombas de calor.

Herramienta	Uso
MS Word	Redacción del Informe
MS PowerPoint	Esquemas/Gráficos
MS Excel	Gestión de datos / cálculos
ArcGIS Pro	Mapeo / Georreferenciación / mapas
PVSYST	Dimensionamiento FV
MS Power BI	Gestión de datos / Cálculos / Conexión interactiva
SketchUp	Arquitectura / Diseño 3D / Interiorismo

Tabla 1. Herramientas utilizadas.

El conjunto de estos materiales ha permitido realizar una evaluación integral y multidimensional del modelo propuesto, combinando la perspectiva teórica y normativa con el análisis técnico y económico.

De esta manera, el corpus documental y los datos técnicos utilizados garantizan la validez científica y la rigurosidad metodológica del trabajo, asegurando que las conclusiones obtenidas se fundamenten en evidencia contrastada, actual y verificable.

9. DATOS DE PARTIDA

9.1. Selección de emplazamiento

La vivienda objeto del estudio se ubica en La Guardia de Jaén (Andalucía), a unos 8 km al norte de la capital provincial, en un entorno rural de relieve moderado y buena accesibilidad; su altitud es de ≈635 m y las coordenadas facilitadas son 38°17'13.8" N, 2°35'01.0" W (38,287176; −2,583612). El clima es mediterráneo continentalizado, con veranos secos y calurosos e inviernos frescos, y un recurso solar muy elevado: en la provincia se registran ≈3.289 h de sol/año y una irradiación media diaria de ~5,852 kWh/m²·día (European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2025), lo que sitúa a la zona entre las de mayor potencial fotovoltaico de España. A partir de este emplazamiento se aborda el dimensionado y análisis de un sistema fotovoltaico aislado para una vivienda rural ocupada por tres personas, en la que toda la energía se genera, almacena y gestiona localmente, considerando generador FV, acumulación, inversor-cargador y protecciones.

9.2. Características de la vivienda

El concepto de vivienda como objeto de estudio es de tipo unifamiliar, aislada y de uso permanente, concebida bajo criterios de sostenibilidad y autosuficiencia energética.

Posee una superficie construida aproximada de 130 m², distribuida en dos plantas y equipada con las

instalaciones necesarias para garantizar el confort y el funcionamiento independiente del sistema energético. El inmueble está destinado a uso residencial habitual, con una ocupación principal de tres-cuatro personas.

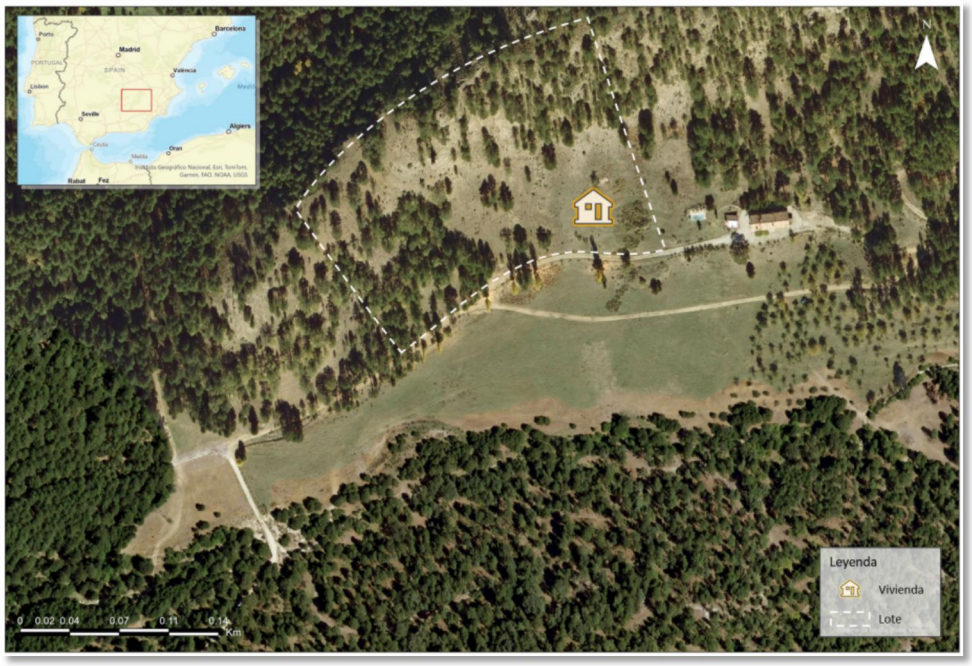


Figura 5. Mapa de referencia de la vivienda - Fuente: Propia.

9.3. Horizonte temporal del estudio

El horizonte temporal considerado para el presente análisis se inicia en el año 2025 y se extiende hasta el año 2050, abarcando un periodo total de 25 años. Durante este intervalo se prevé evaluar la viabilidad técnica y económica del modelo de vivienda autosuficiente, así como la evolución de los costes energéticos y del rendimiento de los sistemas instalados.

9.4. Consumos energéticos de referencia

Los consumos energéticos de la vivienda se estiman a partir de valores medios residenciales para una familia de tres-cuatro personas, considerando hábitos de uso y climatología local.

La demanda eléctrica anual se aproxima a 4.000 kWh/año, destinada principalmente a iluminación, electrodomésticos y equipos electrónicos. En cuanto a la calefacción, se estima un consumo térmico de 445 kWh/año, que será cubierto mediante un sistema de aerotermia con elevado rendimiento energético. El consumo de agua se calcula en 130 litros por persona y por día, lo que representa un promedio total de 390 litros diarios para el conjunto del hogar.

9.5. Recursos disponibles

Recurso solar

La vivienda se ubica en la provincia de Jaén (España), una zona con excelente disponibilidad de radiación solar, lo que permite el aprovechamiento eficiente de la energía fotovoltaica.
La irradiación media anual es de 5,852 kWh/m²·día, correspondiente a una inclinación óptima de 60°, lo que garantiza un alto potencial de generación eléctrica durante todo el año.
Este recurso constituye la base principal del sistema energético propuesto, al ser la fuente renovable más abundante y constante del emplazamiento.

Recurso hídrico

El emplazamiento dispone de un pozo de agua operativo que permite el suministro mediante bombeo eléctrico controlado. La demanda doméstica prevista se estima en 400 litros diarios, valor que cubre las necesidades de consumo, higiene y mantenimiento de la vivienda.
Para garantizar la disponibilidad continua, se contempla un tanque de almacenamiento de 2.000 litros, que actúa como sistema de reserva ante posibles contingencias o interrupciones temporales del bombeo.

9.6. Flujo de trabajo

La definición del flujo de trabajo permite crear una visión amplia de como avanzar con el análisis. En primer lugar, se definen los objetivos en base a la hipótesis planteada, se crean escenarios acordes al horizonte temporal y una justificación como punto de partida. Es importante definir la ubicación de la vivienda considerando el tipo de clima y recursos disponibles como una oportunidad para que el concepto de vivienda se convierta en algo realista y alcanzable.

Contando con la ubicación se precede a obtener datos de consumo para los cálculos de demanda de electricidad, calefacción y agua sanitaria. Estos datos son las bases para definir la tecnología a utilizar y calcular el dimensionamiento de ellas:

- Tipo de bomba, tamaño del tanque de agua, tipo de sistema de calefacción a instalar, cantidad de paneles, cantidad de baterías

Una vez realizado el dimensionamiento de las tecnologías, se incorporan datos económicos para calcular CAPEX y OPEX para realizar una apropiada evaluación económica para el horizonte temporal definido previamente.

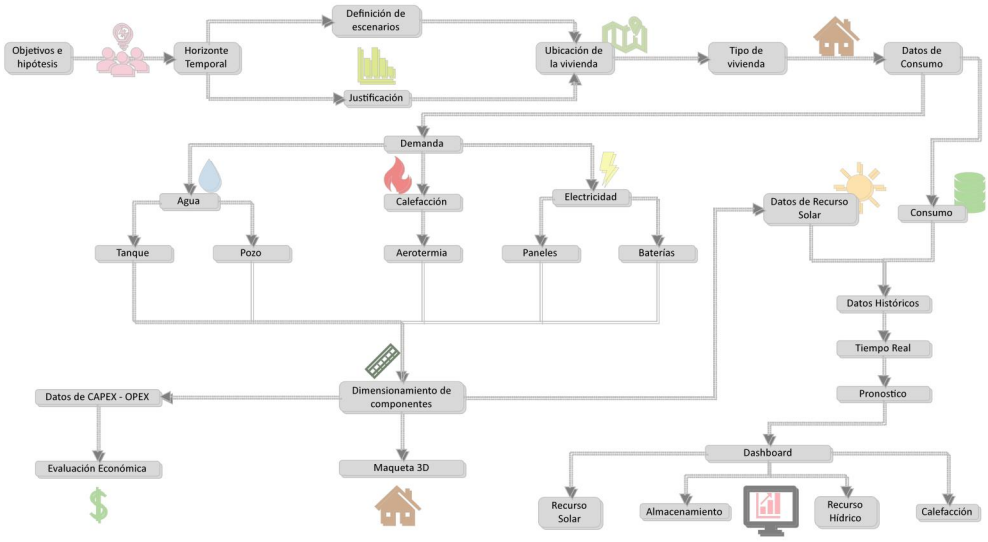


Figura 6. Flujo de trabajo - Fuente: Propia

En paralelo, se diseña el concepto arquitectónico de la vivienda, dándole forma al sistema e integrando las tecnologías con análisis de datos e inteligencia artificial. Estos datos son analizados e incorporados a un tablero con interfaz de usuario inteligente (diseñado a medida e "in house") que se encuentra instalado en el garaje, con la habilidad de actuar como micro-central de la vivienda.

10. METODOLOGÍA Y PROCESO DE REDACCIÓN DEL TFM

Para la redacción del informe, el equipo se enfocó fuertemente en darle estructura al documento, organizando las secciones, y planificando los cálculos, análisis y redacción en una tabla de seguimiento definida por sus capítulos, subapartados, responsables y avance.

10.1. Enfoque del análisis

Evaluar viabilidad técnica y económico de un sistema FV con almacenamiento de baterías para una vivienda totalmente autónoma en el suministro energético con un enfoque: mixto (cuantitativo para desempeño y costos, cualitativo para aceptación y operación).

La propuesta combina tecnología fotovoltaica con almacenamiento avanzado en baterías y un garaje modular inteligente que actúa como micro-central energética, capaz de abastecer la vivienda y facilitar la carga de vehículos eléctricos.

El estudio no se limita al concepto creativo y técnico, sino que incorpora un dimensionamiento preciso de cada componente del sistema y un análisis económico comparativo a 25 años. Este análisis compara el desempeño, la inversión inicial y el retorno económico de la solución off-grid frente a una vivienda convencional conectada a la red, evaluando indicadores clave como el ahorro energético, el nivel de autonomía, el impacto ambiental y la independencia energética.

Con esto, se busca demostrar la viabilidad técnica, económica y medioambiental de este modelo de vivienda, aportando una visión futurista, creativa y práctica de cómo las tecnologías renovables, el almacenamiento y la gestión inteligente pueden converger para transformar el concepto de hogar hacia uno más sostenible, resiliente y adaptado a las demandas del futuro.

Criterios de diseño

- Priorizar consumo de excedentes fotovoltaicos para bombeo de agua.
- Minimizar uso de baterías en operaciones no críticas.
- Dimensionamiento adaptado a picos de demanda y variaciones de ocupación.
- Optimización mediante gestión inteligente de la energía (IA y previsiones meteorológicas).

10.2. Methodology

This project evaluates the technical and economic feasibility of a fully autonomous energy system that combines photovoltaic (PV) generation and aerothermal technology for residential use. The study adopts a mixed approach,quantitative for performance and cost analysis, and qualitative for user acceptance and operational assessment.

The proposal involves the integrated design of a self-sufficient home, equipped with renewable generation technologies, advanced battery storage, and a smart modular garage functioning as a micro–energy hub capable of supplying the household and charging electric vehicles.

Beyond conceptual and technical design, the research includes a precise sizing of all components and a 20-year economic comparison between the off-grid solution and a conventional grid-connected dwelling. Key performance indicators,such as energy savings, autonomy level, environmental impact, and energy independence—are analyzed to assess long-term viability.

The project demonstrates the technical, economic, and environmental feasibility of this housing model, offering a forward-looking and practical vision of how renewable technologies, energy storage, and intelligent management can converge to create sustainable and resilient homes.

11. ESTUDIO URBANO / PAISAJÍSTICO CON JUSTIFICACIÓN NORMATIVA

El emplazamiento se sitúa en suelo rústico de baja densidad del término municipal de Jaén (Andalucía), idóneo para una edificación aislada de bajo impacto. La implantación se ajusta al marco urbanístico andaluz vigente , y su Reglamento (Junta de Andalucía, Consejería de Fomento,

Articulación del Territorio y Vivienda, 2022) ,que sustituyen a la antigua LOUA y al planeamiento municipal, priorizando integración volumétrica y cromática, minimización del impacto visual y preservación de vegetación autóctona. En clave ambiental y energética, el proyecto se alinea con la Ley andaluza 8/2018 y con el CTE modificado por RD 732/2019, cumpliendo especialmente DB-HE (ahorro de energía), DB-HS (salubridad) y DB-SI (seguridad en caso de incendio). Al no preverse afecciones sobre espacios protegidos ni cauces, y tratándose de vivienda aislada, su tramitación considerará, en su caso, la Ley 21/2013 de evaluación ambiental para verificar compatibilidad de usos y ausencia de impactos significativos. Con todo, el diseño adopta soluciones pasivas, materiales acordes al paisaje y FV integrada, reforzando la coherencia entre desempeño energético y protección paisajística.

12.CÁLCULO NECESIDADES ENERGÉTICAS DE ZONA DE IMPLANTACIÓN Y DÉFICIT DE EERR.

La evaluación energética realizada para el emplazamiento de Jaén determina una demanda total anual de 4.540 kWh, considerando los consumos eléctricos y térmicos de una vivienda unifamiliar de tres ocupantes, con calefacción y un margen adicional del 10 % por pérdidas. Con una irradiación media de 5,85 kWh/m²·día y un rendimiento global del sistema fotovoltaico del 75 %, la producción específica local se estima en 1.602 kWh por kWp instalado.

Para alcanzar la autosuficiencia energética total, la potencia mínima requerida es de 2,84 kWp, lo que permite cubrir el 100 % de la demanda anual.
El sistema propuesto en el proyecto (11 kWp de potencia fotovoltaica y 54,6 kWh de almacenamiento) genera aproximadamente 17.620 kWh/año, superando ampliamente las necesidades de la vivienda y creando un excedente de 13.080 kWh/año, que puede destinarse a la carga de vehículos eléctricos, bombeo o respaldo energético.

En términos globales, la vivienda logra una transformación del 100 % de energía convencional a energía renovable, eliminando el déficit energético local y aportando un modelo replicable de autosuficiencia para zonas rurales de alta irradiación.

13. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

13.1. Generadores fotovoltaicos

Para el generador se seleccionaron módulos mono-faciales Atersa A- 400M GS 108 (Aplicaciones Técnicas de la Energía, S.L. (ATERSA), 2024). Según su ficha técnica, cada panel ofrece una potencia máxima (P_{max}) entre 395 y 415 W, con voltaje de máxima potencia (V_{mp}) en torno a 31 V, corriente

de máxima potencia (I_{mp}) cercana a 13 A, tensión en circuito abierto de 37 V y corriente de cortocircuito de 14 A. La eficiencia del módulo se sitúa entre el 20,2 % y el 21,3 %, lo que permite obtener alta producción por superficie. Estos paneles emplean 108 celdas PERC partidas, lo que reduce las pérdidas por sombreado parcial y mejora su comportamiento a alta temperatura. Cada módulo mide 1 722 × 1 134 mm, con marco de aluminio anodizado y vidrio de 3,2 mm; su peso es de 22 kg.

Para el mes más exigente (diciembre), el consumo medio diario es 26,7 kWh/día y la radiación disponible en plano inclinado 60° es 4,592 kWh/m²·día. Con módulos de 400 Wp y un rendimiento de sistema (PR) de 0,85, los cálculos detallados en base a recomendaciones del "Boletín Solar Fotovoltaica Autónoma SunFields Europe" (Alonso Lorenzo, 2001) en el Anexo arrojan 17,11 módulos, que se redondean a 18 para asegurar cobertura en el mes crítico. A nivel eléctrico, la relación entre Vbat = 48 V y la Vmp del módulo = 31,05 V exige 2 módulos en serie por cadena para operar cómodamente en el rango del MPPT. Para completar el campo, se disponen 9 cadenas en paralelo, totalizando 18 módulos (2×9). Esta configuración sencilla y robusta cubre la demanda del peor mes con un margen razonable frente a pérdidas y variabilidad climática, manteniendo además una arquitectura fácil de escalar.

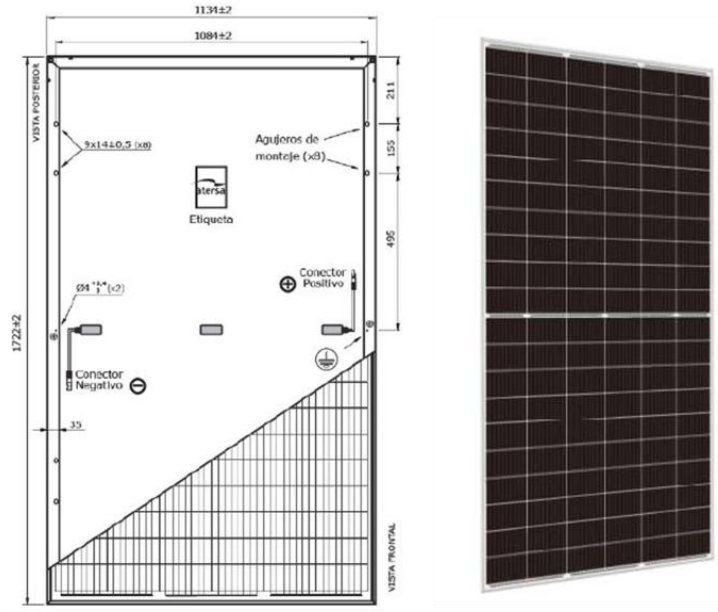


Figura 11. Paneles solares – ATERSA – Modelo A-400M GS Mono PERC 108 Medias célula - 395-415 Wp. Fuente: Atersa.

13.2. Almacenamiento energético (baterías)

La energía sobrante durante las horas de sol debe almacenarse para abastecer la vivienda durante la noche y los días nublados. Se propone utilizar baterías de litio BYD Premium LVS 23.0 (BYD Company Limited) debido a su diseño modular y compatibilidad con inversores Victron Multiplus II (Victron

Energy B.V.) . Cada módulo tiene una capacidad de 3,84 kWh a una tensión nominal de 51,2 V; pueden apilarse de 1 a 6 módulos por torre, alcanzando de 3,84 a 23,04 kWh de capacidad útil. El fabricante indica una corriente de descarga continua de hasta 250 A para torres de 5 o 6 módulos y una eficiencia de ida y vuelta ≥ 95 %.

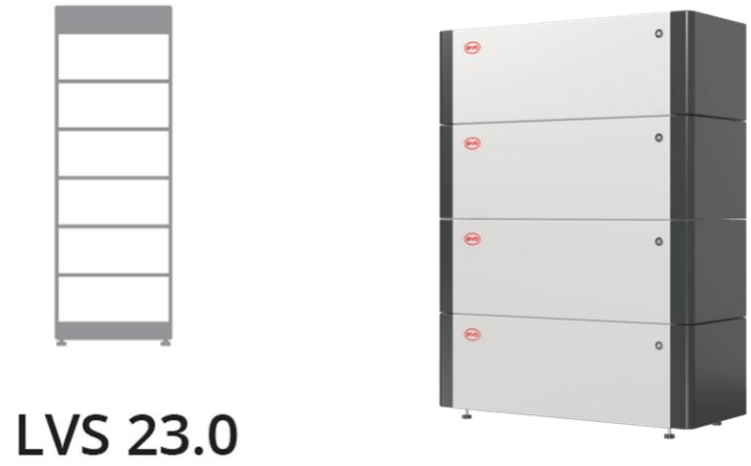


Figura 14. Baterías BYD – Modelo Battery-Box Premium LVS. Fuente: BYD,.

Cálculos de producción y almacenamiento

El dimensionamiento del sistema energético constituye una de las fases más importantes del diseño, ya que de él depende la capacidad de la vivienda para alcanzar la autosuficiencia energética. En este apartado se presentan los cálculos de demanda, producción y almacenamiento necesarios para garantizar el correcto funcionamiento de la vivienda *off-grid*, ubicada en la provincia de Jaén (España), donde la radiación solar media anual es de 5,85 kWh/m²·día.

La vivienda presenta un consumo eléctrico estimado de 4.000 kWh/año, correspondiente a iluminación, equipos de refrigeración, electrodomésticos y bombeo de agua. A esta demanda se añade el consumo de calefacción, valorado en 445 kWh/año de energía térmica, cubierta mediante un sistema de aerotermia con un coeficiente de rendimiento (COP) de 3,5.
El aporte eléctrico equivalente para este sistema se calcula como:

$$Ecalef = \frac{445}{3.5} = 127\ kWh/año$$

Por tanto, la demanda total eléctrica asciende a:

$$Ecalef = 4000 + 127 = 4.127\ kWh/año$$

13.3. Producción fotovoltaica

La energía generada por cada kW de potencia instalada se estima mediante la siguiente expresión:

$$Epv \;=\; HSP\; x\; 365\; x\; PR$$

Donde:

- **HSP**: horas solares pico = 5,85 kWh/m²·día
- **PR**: rendimiento global del sistema = 0,75

$$EPV \;= 5{,}85 \;\times\; 365 \;\times\; 0{,}75 \;=\; 1602\; kWh/kW$$

Cada kW fotovoltaico instalado produce, por tanto, alrededor de **1.600 kWh/año** en Jaén.

Para cubrir la demanda total de la vivienda:

$$\boldsymbol{Pinstalada} \;=\; \frac{4540}{1602} = 2.84\; kWp$$

La potencia mínima teórica necesaria sería de 2,84 kWp, equivalente a 18 módulos de 400 Wp. No obstante, con el fin de garantizar excedentes, cubrir los meses de menor radiación y permitir futuras ampliaciones, se propone una instalación de 11 kWp, tal como se plantea en el diseño base del proyecto.

13.4. Dimensionamiento del sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento energético está diseñado para proporcionar autonomía durante tres días consecutivos, considerando una demanda media diaria de:

$$\boldsymbol{E_{diaria}} = \;\frac{4540}{365} = 12.44\; kWh/dia$$

Por tanto, la energía necesaria para tres días de autonomía es:

$$E_{3dias} \;\;= \;12.44 \;\times\; 3 \;=\; 37.32\; kWh$$

Teniendo en cuenta la eficiencia conjunta de baterías e inversor (0,9 × 0,95 = 0,855) y una profundidad de descarga (DoD) del 80 %, la capacidad nominal requerida es:

$$\boldsymbol{C_{nominal}} \;=\; \frac{37.32}{10.855\; X\; 0.8} = 54.6\; kWh$$

Por tanto, dos bancos de baterías BYD LVS 23.0 que, para 3 días, llegan a cubrir los 54,6 kWh de consumo, equivalente para 51,2 V y 1.060 Ah.

13.5. Dimensionamiento del inversor

El inversor debe garantizar la conversión de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) para todos los equipos eléctricos de la vivienda. Dado el perfil de consumo y la posible coincidencia de cargas de alta demanda (bomba de agua, cocina eléctrica, electrodomésticos), se establece una potencia nominal mínima de 5 kW, con capacidad de sobrecarga temporal hasta 10 kW para picos instantáneos.

El sistema diseñado presenta los siguientes parámetros principales:

Parámetro	Valor estimado	Unidad
Demanda anual total	4 540	kWh/año
Potencia FV mínima teórica	2,84	kWp
Potencia FV propuesta	11	kWp
Producción anual esperada	17 620	kWh/año
Capacidad útil de baterías	43,6	kWh
Capacidad nominal de baterías	54,6	kWh
Autonomía estimada	3	días
Inversor recomendado	5–10	kW

Tabla 2. Parámetros principales. Fuente: Propia.

La instalación propuesta garantiza una autonomía energética superior al 95 %, cubriendo la demanda eléctrica y térmica anual con generación renovable. Además, el sistema permite gestionar excedentes energéticos para bombeo de agua, climatización o carga de vehículo eléctrico, asegurando así un funcionamiento estable, flexible y sostenible a lo largo de su vida útil.

14.Necesidad y consumo energético

Este cálculo es el punto de partida fundamental para dar forma al diseño y dimensionar un sistema autosuficiente. Es imprescindible determinar cuánta energía requiere la vivienda para garantizar un nivel de suministro (eléctricos, calefacción, agua) adecuado durante todo el año. A partir de estos valores se podrá estimar la demanda diaria, mensual y anual, así como identificar los periodos de mayor exigencia (por el método del mes critico). Este análisis no solo permite conocer el perfil energético de la vivienda (basado en los hábitos), sino que además servirá de base para definir la capacidad de generación, el almacenamiento necesario y la integración de tecnologías renovables que aseguren la viabilidad técnica y económica del modelo off-grid.

14.1. Electricidad y Calefacción

Para dimensionar un sistema aislado es imprescindible conocer el consumo. Se elaboró un cuadro de cargas donde se inventariaron los electrodomésticos, potencias nominales y tiempos de uso. Las necesidades de la vivienda se sintetizan en dos escenarios:

- **Periodo invernal (octubre a abril).** Se estimó un consumo medio diario de 31,467 kWh, que incluye iluminación, nevera, cocina de inducción, bombas, termo eléctrico y otros equipos en estado de espera. En estos meses se requiere energía adicional para calefacción y agua caliente sanitaria. El cálculo incorpora un factor de seguridad del 10 % para prever posibles picos de demanda.
- **Periodo estival (mayo a septiembre).** Al disminuir el uso de calefacción y aumento de la insolación, el consumo medio diario se reduce a 21,708 kWh.

TABLA DE IRRADIANCIA MEDIA MENSUAL GD - Estas unidades están en KWh/m2/dia									
Mes	0º	10º	20º	30	40º	50º	60º	L_{MD}: Consumo medio Diario(Wh/dia)	Consumo medio Diario(KWh/dia)
Ene	2,718	3,391	3,974	4,455	4,837	5,058	5,158	26713,6736	26,7137
Feb	3,824	4,245	4,751	5,142	5,405	5,530	5,511	26713,6736	26,7137
Mar	5,408	5,910	6,338	6,610	6,716	6,646	6,415	26713,6736	26,7137
Abr	6,864	7,449	7,674	7,731	7,558	7,217	6,691	26713,6736	26,7137
May	6,477	6,832	6,798	6,611	6,286	5,822	5,226	20947,1150	20,9471
Jun	6,918	6,852	6,704	6,405	5,982	5,435	4,765	20947,1150	20,9471
Jul	7,866	8,012	7,900	7,602	7,149	6,524	5,742	20947,1150	20,9471
Ago	6,652	7,675	7,786	7,713	7,453	7,006	6,382	20947,1150	20,9471
Sep	5,453	5,910	6,232	6,408	6,430	6,294	6,002	20947,1150	20,9471
Oct	3,945	4,380	4,785	5,075	5,245	5,282	5,185	26713,6736	26,7137
Nov	2,898	3,634	4,196	4,653	4,990	5,186	5,264	26713,6736	26,7137
Dic	2,371	2,933	3,465	3,909	4,252	4,482	4,592	26713,6736	26,7137
Media anual	5,116	5,602	5,884	6,026	6,025	5,874	**5,578**		

Tabla 3. Energía mensual demandada - Fuente: Propia.

Para el cálculo se utilizaron valores de irradiación media diaria procedentes de la base PVGIS para un plano inclinado (a diferentes ángulos) en Jaén y un coeficiente de rendimiento global (performance ratio) de 0,75 que incluye pérdidas por temperatura, cableado, inversor y gestión de carga. La producción mensual por kW se obtuvo multiplicando la irradiación diaria por 0,75 y por el número de días de cada mes. La producción del sistema resulta de multiplicar por 11 kW. El superávit se calcula restando el consumo mensual.

14.2. Recurso Hídrico

Para una vivienda unifamiliar en Jaén, habitada por 3 personas, se estima un consumo de referencia 130 L/persona·día (INE, 2022), equivalente a 390 L/día para el total de la vivienda. Se asume pozo y bomba ya instalados (no se consideran costes ni ingeniería de perforación/equipamiento).

Los periodos de mayor demanda se concentran durante la mañana y tarde (duchas, cocina, lavadora/lavavajillas). Para el cálculo y diseño se opta por un valor de 400 L/día, que cubre variabilidad estacional y picos de ocupación moderados.

Se estima que un tanque de reserva de 2000 litros cubriría las necesidades, garantizando el consumo de al menos 5 días. Dando suficiente margen para ejecutar el bombeo en horas de exceso del recurso solar.

$$Autonomia = \frac{Volumen\ del\ Tanque}{Consumo\ diario} = \frac{2000\ Litros/dia}{400\ Litros/dia} = 5\ dias$$

14.2.1. Gestión autónoma del recurso hídrico

La gestión autónoma del recurso hídrico de la vivienda se ejecuta mediante un sistema de bombeo alimentado por energía solar fotovoltaica y acompañado por un tanque de reserva. El objetivo es garantizar el suministro continuo de agua para una familia de cuatro personas, utilizando únicamente el uso de excedentes del recurso solar para minimizar consumos de batería. Por practicidad, se asume la existencia de un pozo operativo con bomba instalada, por lo tanto, se excluyen del este análisis los costes de ingeniería de perforación, equipamiento e instalación del sistema hidráulico. El análisis se enfoca en la integración energética, control operativo y el dimensionamiento funcional del almacenamiento.

Demanda de agua y tanque de reserva:

- Consumo de referencia:
- 130 L/persona x día
- 390 L/día para 3 personas
- Para diseño se considera 400 L/día
- Periodos de mayor demanda: mañana y tarde (duchas, cocina, lavadora/lavavajillas)
- Capacidad propuesta de tanque: 2000 L
- Autonomía: 5 días

Operación

El tanque de reserva presenta una boya, que ordena recarga cuando el nivel desciende por debajo del 80% del volumen total del tanque (1.600 litros). Dado que el hogar consume alrededor de 400

L/día, el umbral se superaría a diario. De ocurrir durante la noche, la recarga se difiere a la mañana y se ejecuta con excedente fotovoltaico.

- Frecuencia de arranque: 1 vez al día, durante ventana solar.
- Demanda daría: 400 Litros.

Bomba

El sistema opera con una bomba solar sumergible tipo LORENTZ con variador de frecuencia integrado (VRI). A diferencia de un equipo a 50 Hz fijos, el VRI modula la frecuencia y la velocidad del motor en función del recurso solar disponible (irradiación):

- Cuando hay poco sol la bomba gira más lento generando menor caudal y, a medida que aumenta la disponibilidad del recurso solar, acelera generando un mayor caudal.
- Este régimen variable permite ampliar la ventana diaria de operación: arranca antes por la mañana y se mantiene activa más tiempo por la tarde, aprovechando prácticamente toda la "campana" solar sin necesidad de baterías.
- El sistema se coordina con la boya del tanque y con el inversor ya que solo habilita la bomba cuando existe excedente solar.
- Si el nivel cae por debajo del 80 % durante la noche, la orden de la boya queda pendiente y la bomba arranca al amanecer con baja frecuencia y caudal reducido, incrementándolo conforme crece el recurso solar.

Integración fotovoltaica y demanda energética

La gestión del recurso hídrico de la vivienda es operada por el controlador, en la cual intervienen los paneles, la bomba sumergible (con variador de frecuencia) y el tanque (con boya de nivel).

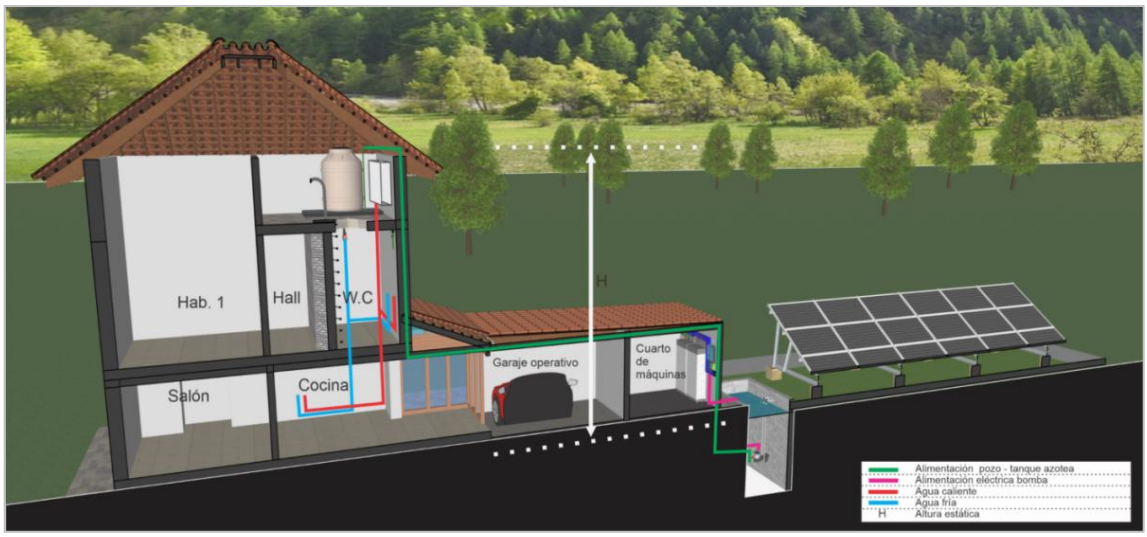


Figura 7. Bombeo solar doméstico: recorrido hidráulico casa–pozo–tanque y elementos de control. Fuente: Propia

El controlador opera todo el sistema de recurso hidráulico usando la señal de la boya de nivel del tanque y el estado del recurso solar.

Detección de demanda

- El controlador lee continuamente el nivel del tanque.
- Si el nivel de la boya cae a un valor menor al 75 %, declara demanda de recarga.
- Si el nivel de la boya es igual o mayor al ≥ 75 %, el sistema permanece en stand-by.

Verificación del recurso

- Ante demanda de recarga, el controlador verifica el excedente solar.
- Si existe excedente del recurso solar:
- Recurso necesario para cargar las baterías como prioridad)
- Arranca la bomba y comienza el llenado.
- Si no suficiente recurso solar:
- El sistema se encuentra funcionando con baterías, o el recurso solar no es suficiente para cargar las baterías y utilizar la bomba simultáneamente.
- La bomba queda en stand-by y el controlador espera hasta que reaparezca el excedente.

Bombeo y corte

- Mientras la bomba está en marcha, el controlador sigue leyendo el nivel mediante la boya:
- Al alcanzar el 100 % del volumen del tanque, detiene la bomba y pasa a stand-by.
- Si durante el llenado desaparece el excedente (déficit solar), pausa la bomba y retoma automáticamente cuando vuelve el excedente (paso 2).

Cada vez que el controlador lea el nivel de la boya vuelva a ser menor al 75 %, se repite el proceso: verifica excedente y, de haberlo, reactiva la bomba hasta completar el tanque. Así se asegura el suministro usando prioritariamente la energía solar disponible.

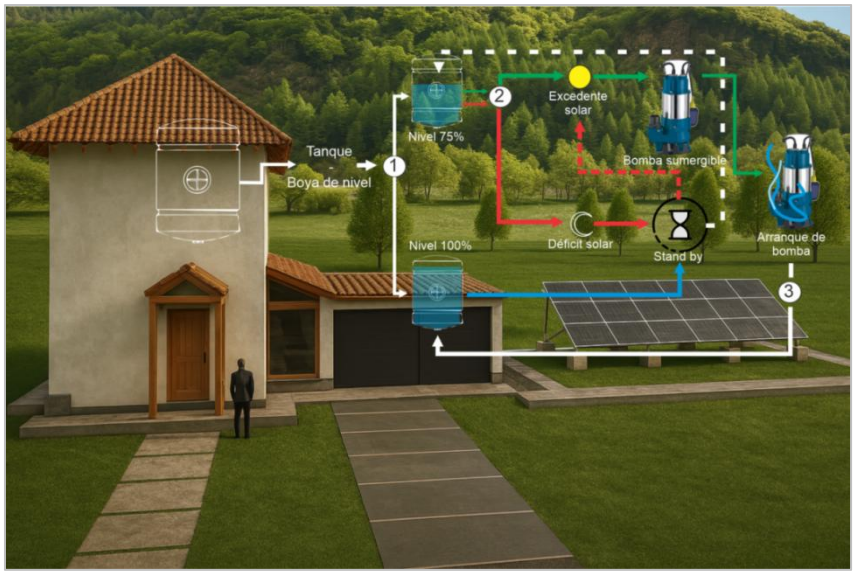


Figura 8. Esquema de operación (controlador – paneles - boya - bomba).Fuente: Propia

Desde el punto de vista energético, el requerimiento del bombeo es de 0,0000908 kWh/L. Con una demanda de ≈ 400 L/día, la energía diaria es ~0,036 kWh, lo que supone ~13,3 kWh/año. Así, el tanque actúa como almacenamiento hidráulico, absorbiendo el exceso de recurso solar y evitando el uso de las baterías.

14.3. Escenarios de consumo energético

Se definen tres escenarios operativos en función de la prioridad o criticidad de las cargas:

Prioridad 3 (Normalidad): Funcionamiento normal de la vivienda, con todas las cargas en servicio (uso habitual de todos los electrodomésticos, iluminación, climatización y demás equipos).

Prioridad 2 (Alerta): Modo de ahorro o alerta, en el cual se racionaliza el consumo. Solo operan las cargas necesarias y se reducen o eliminan temporalmente ciertos usos no esenciales para disminuir la demanda (por ejemplo, uso limitado de climatización, cocina, u otros aparatos de alto consumo).

Prioridad 1 (Emergencia): Modo mínimo de operación ante una situación crítica (por ejemplo, falla de red eléctrica prolongada). Solo permanecen cargas esenciales como iluminación básica, refrigerador y dispositivos imprescindibles, prescindiendo por completo de consumos prescindibles (aire acondicionado, electrodomésticos secundarios, etc.). Este escenario minimiza la demanda energética para alargar la autonomía con las fuentes de respaldo.

Patrones de uso y factores de simultaneidad

Para cada tipo de equipo se estimaron las horas de uso diario en cada escenario, diferenciando entre meses de verano e invierno dado que en Jaén los veranos son muy calurosos y los inviernos fríos. Se aplicaron factores de simultaneidad (probabilidad de uso concurrente) para reflejar que no todos los equipos funcionan al mismo tiempo, así como un factor de incremento por número de personas en ciertos consumos (por ejemplo, uso de agua caliente o iluminación adicional si hubiera más ocupantes que la base de 3 personas). También se han incluido consumos en stand-by de los equipos suponiendo que permanecen conectados a pesar que estén apagados (International Energy Agency, 2001).

Eficiencias y márgenes de seguridad

Los cálculos incluyen la eficiencia del inversor (valor nominal considerado: 90%) y de las baterías de almacenamiento (95%), de modo que la energía requerida desde las fuentes primarias es mayor que la consumida finalmente por los aparatos. Adicionalmente, se introdujo un margen de seguridad en los consumos estimados (un 10% adicional para cargas AC y 20% para cargas DC) para contemplar pérdidas menores no modeladas y posibles incrementos de consumo futuros. Este factor de seguridad aumenta ligeramente las cifras de consumo diario utilizadas para el diseño, asegurando que el sistema esté sobredimensionado de forma prudente.

Seguidamente, a continuación, se presentan los resultados detallados de consumo para cada escenario, seguidos de un análisis estacional (verano vs. invierno) y una comparación general (las tablas y cálculos se muestran en anexo 5.1).

14.3.1. Escenario Prioridad 3 (Normalidad)

En condiciones cotidianas, la vivienda opera con total normalidad y no se restringe el uso de ningún equipo. Todos los sistemas de iluminación, climatización y electrodomésticos funcionan según un perfil típico diario.

Consumo diario

Bajo este escenario, el consumo energético total asciende aproximadamente a 24–28 kWh por día en promedio, dependiendo de la época del año. En los meses de invierno, el consumo diario tiende hacia el rango superior (~27 kWh/día) debido a las cargas adicionales de calefacción (por bomba de calor tipo split funcionando en modo calefacción) y a un mayor uso de iluminación durante las tardes más largas. En verano, el consumo diario típico ronda los ~22 kWh/día, ya que, aunque hay aporte de carga por aire acondicionado en refrigeración, los días más largos reducen la necesidad de iluminación y ciertos equipos tienen un uso ligeramente menor. Aplicando el factor de seguridad mencionado, las cifras de cálculo consideradas son algo mayores, pero en este análisis comentaremos valores efectivos aproximados para facilitar la interpretación.

Reparto AC/DC

La mayor parte de este consumo corresponde a cargas AC convencionales. Por ejemplo, casi un 95% del consumo diario en este escenario proviene de los electrodomésticos, climatización, y otros equipos conectados a la red AC de la vivienda. Las cargas en DC (iluminación LED 12 V, cargadores USB, pequeños ventiladores DC, etc.) aportan alrededor de un 5% del consumo total diario (del orden de 1–1.5 kWh/día), una fracción relativamente pequeña pero importante en casos de respaldo energético, ya que operan eficientemente sin convertir energía mediante inversor.

Consumo anual estimado

Extrapolando los perfiles diarios, el consumo eléctrico anual de la vivienda en el escenario de normalidad se estima en torno a 8.5–9 MWh al año (entre 8500 y 9000 kWh/año). Esta cifra es coherente con una vivienda familiar que emplea equipos de climatización y demás electrodomésticos de manera regular. El consumo no es uniforme a lo largo del año, presentando picos en invierno que superan a los de verano, como se detallará en el apartado estacional más adelante.

Autonomía con almacenamiento

Considerando un sistema de baterías capaz de cubrir este consumo (02 módulos BYV LVS 23.0) la autonomía resultante bajo condiciones de normalidad sería limitada debido a la alta demanda. Con la capacidad de batería estimada en el diseño, se alcanzaría aproximadamente 1.1 días de autonomía (unas 26 horas) manteniendo todos los consumos habituales sin recarga externa. En otras palabras, si la vivienda dependiera únicamente de baterías (por fallo de red o ausencia de generación solar) durante el escenario de normalidad, podría abastecer su consumo eléctrico por poco más de un día antes de agotar la energía almacenada. Esta autonomía relativamente corta pone de manifiesto la

importancia de reducir cargas en situaciones de contingencia, lo cual justamente se aborda en los siguientes escenarios.

14.3.2. Escenario Prioridad 2, modo de Alerta (Ahorro)

En el escenario de alerta (Prioridad 2), se implementan medidas de ahorro y se prioriza el funcionamiento de las cargas más necesarias. En la práctica, esto implica desconectar o limitar temporalmente ciertos aparatos de alto consumo y ajustar hábitos para disminuir la demanda energética. Por ejemplo, en este modo se podría restringir el uso del aire acondicionado o calefacción (manteniéndolos apagados o a niveles mínimos cuando sea posible), posponer el uso de electrodomésticos como lavadora o lavavajillas, y apagar iluminación no esencial.

Reducción de consumo diario

Gracias a estas acciones de racionalización, el consumo eléctrico diario de la vivienda se reduce de forma significativa en comparación con la normalidad. Se estima un consumo medio alrededor de 18–20 kWh por día en este escenario. En términos porcentuales, esto supone aproximadamente un 20% menos de energía diaria que en condiciones normales. Gran parte del ahorro proviene de la disminución de cargas AC, especialmente aquellas asociadas a climatización y grandes electrodomésticos. En cuanto a las cargas DC (iluminación básica, electrónica de bajo consumo) permanecen prácticamente iguales que en el escenario normal, ya que esas se consideran necesarias y su contribución al total es menor. Así, la fracción de consumo debido a cargas AC disminuye ligeramente (quizá al ~90–94% del total), mientras que las cargas DC podrían representar hasta un ~6–10% del consumo restante, simplemente porque el pastel total se achica.

Gestión de cargas

En modo alerta, es de suponer que no se usa calefacción eléctrica ni aire acondicionado salvo casos imprescindibles; la climatización podría sustituirse parcialmente por métodos pasivos (abrir ventanas, abrigo adicional, etc.). Asimismo, podría reducirse la temperatura de calentamiento de agua o la frecuencia de duchas calientes para ahorrar energía si el calentador es eléctrico. Los alimentos podrían cocinarse en momentos aprovechando calor residual o usar métodos alternativos si fuera posible. La iluminación se limita a las áreas ocupadas, evitando luces encendidas innecesariamente. Todos estos cambios operativos contribuyen a la reducción mencionada de ~4–6 kWh diarios respecto al escenario normal.

Consumo anual estimado

Si el modo alerta se mantuviera todo el año (hipótesis teórica, ya que normalmente es temporal), el consumo anual proyectado rondaría los 7–7.5 MWh/año (unas 7200–7500 kWh anuales). Nuevamente, dentro de este total anual reducido, los meses de invierno seguirían presentando un consumo mayor que los de verano, aunque la diferencia estacional se atenúa ligeramente al haberse recortado sobre todo los consumos de climatización.

Autonomía con baterías

La disminución de la demanda eléctrica en alerta extiende la autonomía del sistema de almacenamiento significativamente. Con las mismas baterías disponibles, en este escenario se podría alcanzar cerca de 1.7 días de autonomía (alrededor de 40 horas) sin necesidad de recarga. Esto supone casi medio día adicional en comparación con la autonomía en condiciones de normalidad. Es decir, al limitar los consumos, las baterías podrían mantener el suministro casi dos días completos antes de agotarse, brindando un margen de seguridad mayor ante cortes de energía o baja generación renovable.

14.3.3. Escenario Prioridad 1, modo de Emergencia (solo lo esencial)

El escenario de emergencia (Prioridad 1) representa la situación más restrictiva, en la que únicamente funcionan las cargas estrictamente esenciales para la habitabilidad y seguridad de la vivienda. Este modo se activaría, por ejemplo, durante climas muy desfavorables (baja generación) o cuando la disponibilidad energética sea muy limitada (batería casi agotada). La premisa es preservar energía para maximizar el tiempo de autonomía, asegurando al mismo tiempo las necesidades básicas de los ocupantes. En modo emergencia, se apagan prácticamente todos los aparatos no críticos, no se usa climatización eléctrica, se desconectan equipos de entretenimiento, cocina eléctrica, electrodomésticos de limpieza, bombas auxiliares, etc; y sólo permanecen activos elementos como: iluminación mínima necesaria (luces LED en las habitaciones ocupadas), el refrigerador (para conservar alimentos perecederos), posiblemente un punto de carga para comunicaciones (mantener cargados teléfonos móviles o una radio), y algún dispositivo médico o de soporte vital si lo hubiera.

Mínimo consumo diario

Bajo estas condiciones tan limitadas, el consumo eléctrico se reduce dramáticamente. Se calcula un consumo en torno a 11–12 kWh por día en el escenario de emergencia, lo que equivale aproximadamente a la mitad del consumo diario de la situación de normalidad. Este consumo

reducido proviene casi enteramente de mantener operativos unos pocos equipos esenciales. Por ejemplo, una nevera eficiente puede consumir del orden de 1–2 kWh al día; la iluminación LED básica de la vivienda quizás otros ~1–2 kWh/día dependiendo de las horas encendidas; equipos electrónicos pequeños y cargas en stand by críticas suman una pequeña fracción. En total, las cargas AC esenciales (frigorífico, quizá un router o un ventilador pequeño) suman cerca de 10 kWh diarios, mientras que las cargas DC (iluminación LED de 12 V, dispositivos USB) contribuyen con apenas ~0.8–1 kWh por día. Es decir, en modo de emergencia las cargas DC podrían acercarse al 10% del consumo, ligeramente más que en escenarios previos, dado que casi todo lo demás se ha suprimido.

Consumo anual equivalente

No es usual mantener un hogar todo un año en situación de emergencia, pero si extrapoláramos este nivel de consumo a un año completo, sería del orden de 4.3–4.5 MWh/año (unos 4300–4500 kWh en el año). Esto da una idea del ahorro extremo que supone operar sólo con las cargas esenciales (casi un 50% del consumo de un año normal). Nuevamente, los meses invernales implicarían un consumo algo mayor que los veraniegos incluso en esta modalidad, pero la diferencia se manifiesta principalmente en el uso de iluminación (ya que en emergencia no se contempla calefacción eléctrica de ningún tipo). En invierno las luces permanecen encendidas más tiempo cada día, elevando ligeramente el promedio diario en comparación con verano.

Autonomía máxima con baterías

Gracias a esta drástica reducción, el sistema de baterías puede proporcionar energía durante un período considerable sin apoyo externo. En concreto, la autonomía estimada en escenario de emergencia alcanza aproximadamente 3.0–3.1 días (alrededor de 74 horas). Esto significa que, ante una contingencia, la vivienda podría mantenerse operativa con lo básico por un mínimo de tres días continuos solo con la energía almacenada. Esta autonomía amplia es fundamental en planificación de sistemas aislados, ya que cubre varios días nublados o sin generación. Cabe destacar que lograr casi 3 días de independencia energética requiere recortar los consumos a lo esencial, tal como se plantea en este escenario; de lo contrario, con consumos habituales la batería se agotaría mucho antes (como vimos, en poco más de un día bajo condiciones normales).

14.4. Análisis Estacional del Consumo: Verano vs. Invierno

Una parte importante del perfil de consumo de la vivienda es su variación estacional. Debido al clima de Jaén (veranos muy calurosos e inviernos fríos), las necesidades energéticas de la vivienda cambian entre el verano y el invierno, principalmente por la climatización (refrigeración en verano, calefacción en invierno) y por la diferencia en horas de luz natural que afecta la iluminación eléctrica. A

continuación, se comparan los consumos en meses de verano frente a meses de invierno para cada escenario de prioridad:

Escenario Normalidad (P3): En operación normal, el consumo eléctrico de un día típico de invierno es aproximadamente un 25–30% mayor que el de un día de verano. Como se mencionó, en invierno el uso de energía alcanza alrededor de 27 kWh/día, mientras que en verano ronda 21 kWh/día. Además, el periodo invernal abarca más meses (aproximadamente octubre a abril, unos 7 meses) frente al periodo estrictamente veraniego (mayo a septiembre, ~5 meses), lo que da como resultado que la energía total consumida en la temporada de invierno supere en torno al 75% a la consumida durante la época de verano. En números anuales, alrededor de ~5660 kWh (aprox.) se emplean en los meses fríos, versus ~3200 kWh en los meses cálidos. Esto evidencia que la calefacción y la mayor demanda lumínica en invierno impulsan el consumo muy por encima de lo que requiere la refrigeración en verano en esta vivienda.

Escenario Alerta (P2): Bajo el modo de alerta, la diferencia estacional se mantiene, pero algo atenuada en términos absolutos. En invierno el consumo diario ajustado puede situarse cerca de 24 kWh/día, mientras que en verano baja a 18–19 kWh/día. La proporción invierno/verano sigue siendo elevada: aproximadamente un 50% más de energía en invierno comparada con verano para el mismo intervalo de meses. En cifras estimativas, unos ~4360 kWh se consumirían durante los meses invernales, frente a ~2880 kWh en los veraniegos. La reducción general de consumos en este escenario proviene de limitar equipos como climatización; no obstante, incluso con medidas de ahorro, el invierno continúa imponiendo una mayor carga debido a necesidades mínimas de calefacción (por ejemplo, podría quedar algún uso puntual de estufas de bajo consumo o mayor tiempo de nevera funcionando por el frío externo, etc.) y más horas de iluminación artificial.

Escenario Emergencia (P1): En el modo de emergencia, prácticamente la única diferencia entre invierno y verano en cuanto a consumo proviene de la iluminación, ya que otros sistemas como climatización están ausentes. Aun así, los meses de invierno consumen cerca del doble de energía que los de verano en este escenario extremo. Un día de invierno esencial requiere alrededor de 12–13 kWh (debido a iluminación prolongada y quizás un poco más de trabajo para el frigorífico si la temperatura ambiente es muy baja), mientras que un día de verano esencial puede bajar a 6–7 kWh si apenas se usan las luces por las noches cortas y los equipos esenciales trabajan algo menos. Sumando a lo largo de cada temporada, podríamos estimar del orden de ~2850 kWh consumidos en total durante los meses invernales frente a ~1480 kWh en los meses de verano en modo emergencia. Esta casi diferencia 2:1 refleja que, incluso con la casa en mínimos, el invierno “pesa” más energéticamente hablando. Por ello, cualquier sistema de respaldo o generación autónoma debe

prepararse principalmente para cubrir las demandas del invierno, que es cuando la brecha entre consumo y disponibilidad de recursos (por ejemplo, solar) tiende a ser más crítica.

Escenarios de Consumo		Normalidad	Alerta	Emergencia
Consumo Mes crítico (kWh)	AC	21919,189	16660,545	10731,941
	DC	1023,336	1023,336	831,636
Autonomía (días)		1,10	1,70	3,1
Autonomía (horas)		26,4	40,8	74,4

Figura 10. Escenarios de consumo energético para vivienda "off Grid". Fuente: Propia.

15.Configuración del sistema

15.1. Concepto arquitectónico 3D de la vivienda autosuficiente

El proceso creativo para la generación del concepto 3D de la vivienda, la cual es autónoma en suministro energético, es importante resaltar como las tecnologías digitales permiten crear soluciones sostenibles desde el principio del proyecto. La integración entre la arquitectura, la tecnología y la ingeniería, permiten crear un concepto funcional de la vivienda.

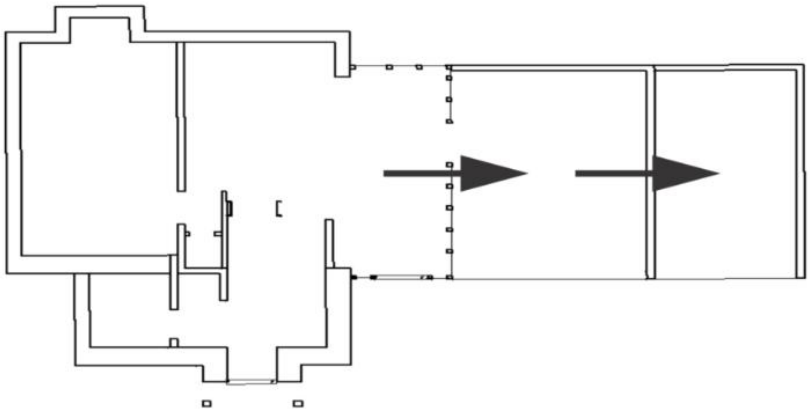


Figura 9. Planos de la vivienda. Fuente: Propia.

Mas allá de la estética, el concepto 3D permite experimentar dimensiones realistas, ya sea de su funcionamiento, como detectando incompatibilidades del sistema. En este proceso se detecta problemáticas como el espacio insuficiente para el cuarto de máquinas, interferencias entre redes hidráulicas y eléctrica. Todo esto para optimizar la relación coste - beneficio de cada componente antes de ejecutar la obra. Para el presente informe se ha realizado el modelado completo en 3D considerando la ubicación y dimensionamiento indicados en capítulos anteriores (Pastrana, Luquez, Urrego, Bolaños, & Mayorga, 2025) (Pinchar el siguiente botón: ▶ para mirar el modelo completo en 3D)..

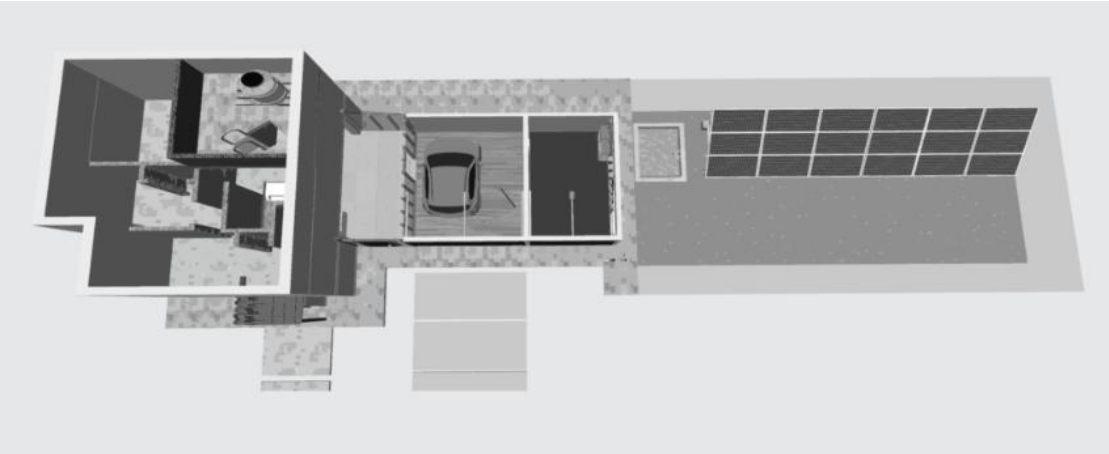


Figura 10. Maqueta 3D de la vivienda. Fuente: Propia.

La visualización del entorno virtual del proyecto funcionara como herramienta pedagógica y de comunicación con clientes, empresas instaladoras y autoridades de control.



Figura 11. Maqueta 3D, operación y entorno virtual de la vivienda. Fuente: Propia.

15.2. Garaje modular como núcleo operativo

El garaje se plantea como el núcleo operativo de la vivienda autosuficiente, integrando en un solo ambiente los elementos principales para la gestión total de los recursos esenciales. Aquí se ubican el tablero controlador inteligente con interfaz de usuario, que supervisa en tiempo real de los flujos energéticos y de agua, así como la toma de decisiones automáticas basadas en previsiones meteorológicas y estados de carga.

Además de su interfaz local en el propio garaje, el sistema incorpora una interfaz remota accesible desde una aplicación móvil, lo que permite al usuario supervisar y gestionar el funcionamiento de la vivienda en tiempo real desde cualquier lugar.

En el garaje también se concentran las conexiones hacia el banco de baterías, alojado en un cobertizo exterior, garantizando el almacenamiento y la entrega de energía de respaldo. Asimismo, desde aquí, se coordina la operación de la bomba sumergible del pozo, priorizando el uso de excedentes fotovoltaicos para el llenado del tanque de agua en la azotea.

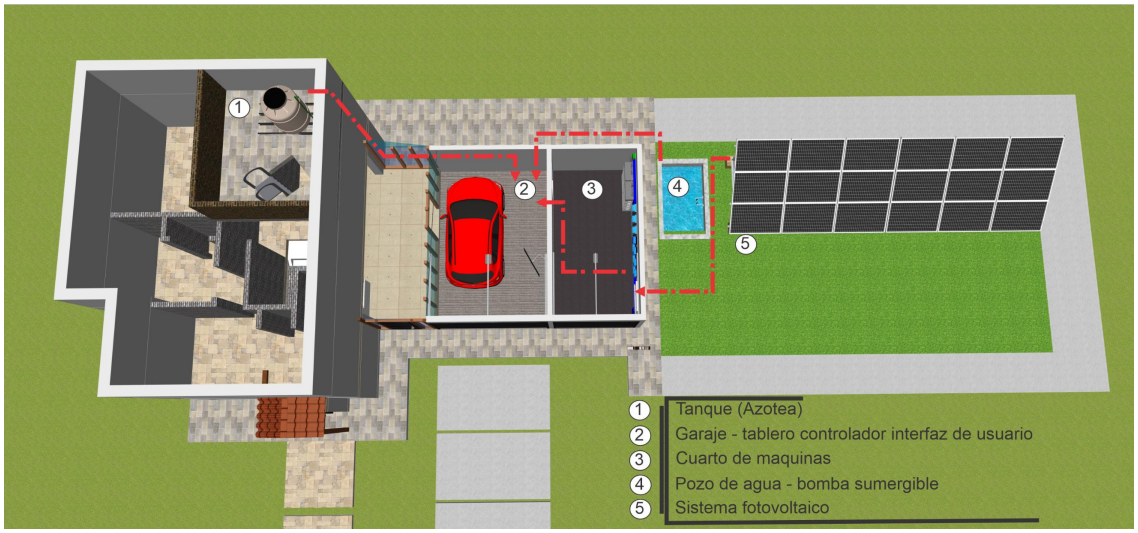


Figura 12. Esquema garaje modular como núcleo operativo de la vivienda off-grid - Fuente: Propia

De esta manera, el garaje no solo funciona como espacio multifuncional, sino como centro vital del sistema off-grid, integrando generación, almacenamiento y gestión para asegurar el suministro continuo de electricidad y agua con el menor impacto posible sobre las baterías y maximizando el uso de energía solar.



Figura 13. Maqueta 3D del garaje modular. Fuente: Propia.

A continuación, se define la importancia de la integración de la pantalla interactiva del garaje y una aplicación móvil de respaldo, resaltando el beneficio para usuario generando una experiencia positiva, comprensible y potente de la gestión del funcionamiento técnico del sistema:

- Control y autonomía: el acceso directo desde la pantalla del garaje y la aplicación móvil ofrece la sensación de control sobre recursos críticos permitiendo tomar decisiones inmediatas como lo son los modos de operación.

- Confianza y reducción de ansiedad: las alertas y visualizaciones en tiempo real le permite al usuario respuestas tempranas y la transparencia técnica reforzando la confianza en el sistema y la inversión.

- Compromiso y aprendizaje: la interacción frecuenta con la interfaz fomenta el compromiso emocional e interacción activa, facilitando el aprendizaje contextual mediante feedback inmediato promoviendo la apropiación del sistema.

- Mejora la toma de decisiones: gracias a los datos históricos, pronósticos y simulaciones se habilitan decisiones informadas que optimizan la eficiencia económica y operativa.

- Impacto social y domestico: la visibilidad del rendimiento energético facilita acuerdos familiares y comportamientos colectivos, al nivel psicológico estas funciones compartidas permiten comparación y aprendizaje comunitario.



Figura 14. Maqueta 3D del garaje modular. Fuente: Propia.

16.Operación y mantenimiento

La operación y mantenimiento del sistema off-grid es verdaderamente esencial para asegurar eficiencia, seguridad y larga vida a los equipos que conforman la casa autosuficiente. El diseño del proyecto incluye una estructura de O&M con monitorización constante, mantenimiento preventivo y acciones correctivas programadas, procurando reducir paradas y extender la vida útil de los componentes.

16.1. Estrategia de operación

La operación diaria se maneja a través de un sistema de control inteligente centralizado, situado en el garaje modular, que funciona como el corazón estratégico del conjunto. Este sistema monitoreo en tiempo real los niveles de generación, consumo, almacenamiento y la carga de las baterías.

Da prioridad a los consumos críticos como la iluminación, refrigeración, comunicaciones y equipos médicos, si la producción baja o surge una emergencia. Tiene la capacidad de optimizar la distribución de energía usando algoritmos predictivos que se adaptan a las condiciones del tiempo y al patrón de uso.

También guarda toda la información de la operación en una plataforma digital para análisis histórico y el mantenimiento planeado. El sistema está diseñado, para funcionar completamente solo, solo pidiendo chequeos cada cierto tiempo por el usuario o algún técnico especializado.

16.2. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo tiene como objetivo evitar fallos antes de que ocurran, garantizando el rendimiento óptimo del sistema a lo largo de su vida útil (≈ 25 años).

Componente	Frecuencia	Tareas principales
Paneles fotovoltaicos	Cada 6 meses	Limpieza superficial para eliminar polvo y suciedad; inspección visual de conexiones, marcos y posibles sombreados.
Inversores	Anualmente	Verificación de rendimiento, comprobación térmica y actualización de firmware del sistema de control.
Baterías	Trimestralmente	Revisión de tensión, temperatura y ciclos de carga/descarga; comprobación de aislamiento y sistema de ventilación.
Aerotermia	Cada 12 meses	Limpieza de filtros, control de presión del refrigerante y revisión de la bomba de calor.
Sistema de gestión y sensores	Cada 6 meses	Calibración de sensores, prueba de comunicación de datos y verificación de la interfaz de usuario.

Tabla 4. Programación de tareas en función de cada componente. Fuente: Propia.

Estas acciones preventivas permiten mantener una eficiencia global superior al 95% y reducir la probabilidad de fallos críticos en más de un 80 %.

16.3. Mantenimiento correctivo.

El mantenimiento correctivo, se aplica, solo si se detectan anomalías o fallos concretos, identificados mediante el sistema de monitoreo, o por revisiones en persona. Gracias a la monitorización inteligente, la casa puede anticipar incidencias y lanzar alertas automáticas, disminuyendo el tiempo fuera de servicio y los costes que vienen pegados.

Las correcciones más habituales comprenden:

- Cambio de fusibles, interruptores, o componentes eléctricos diminutos.
- Actualización o cambio de módulos de baterías deterioradas.
- Revisión, o reajuste del software de control si cambian las configuraciones.

La frecuencia de intervención calculada ronda menos del 2 % al año, demostrando resiliencia del sistema.

16.4. Costes de operación y mantenimiento

El coste total anual de operación y mantenimiento se estima en alrededor de 100 € anuales, lo que representa menos del 1 % del coste inicial de inversión.

Este valor incluye limpieza, reposición de componentes menores y monitorización remota. La vida útil total del sistema se proyecta en 20 años para los módulos fotovoltaicos y 15 años para las baterías, considerando un plan de sustitución parcial al final de su ciclo.

Evaluación global

El modelo O&M propuesto garantiza: alta fiabilidad operativa, autonomía energética constante, reducción de costes a largo plazo, extensión significativa de la vida útil de los equipos.

Cumplimiento de los estándares de seguridad eléctrica y medioambiental (IEC 62446, UNE-EN 50583).

En conclusión, la estrategia de operación y mantenimiento diseñada consolida la sostenibilidad técnica y económica del sistema off-grid, asegurando su funcionamiento eficiente durante todo el ciclo de vida del proyecto.

16.5. Tablero interactivo

El desarrollo del tablero interactivo es simplemente un mero concepto para demostrar las habilidades del equipo de trabajo y el alcance que la tecnología puede tener hoy en día. Sin embargo, la información mostrada es interactiva, mostrando datos reales de recurso y producción solar conectado a un servicio meteorológico que brinda un pronóstico a 14 días (tablero interactivo en tiempo real, 🔗).

La función principal es la de concentrar la supervisión en tiempo real de todos los recursos de la vivienda, desde la producción de energía solar, consumo eléctrico, el almacenamiento de las viviendas y el recurso hídrico. También presenta una interfaz dinámica e inteligente que permite al usuario entender de forma intuitiva el estado global de los sistemas y la vivienda.

16.6. Integración de los datos

16.6.1. Recurso Solar

El tablero se encuentra conectado a una fuente externa de datos meteorológicos y solares (Crossing, 2025) en forma de API (*Application Programming Interface*), la cual permite obtener datos históricos como pronostico hasta 14 días.

Con los datos del recurso solar, son integrados con los cálculos del dimensionamiento del sistema de captación fotovoltaica, en este caso 18 paneles solares de 1084 mm x 1722 mm (1.87 m^2 de área por panel), y de esta forma se estima la producción diaria del sistema en tiempo real.

16.6.2. Recurso Hídrico

El tablero también recibe información del nivel de la boya y del estado de la bomba estado operativo de la bomba (encendida o apagada). Existe un caudalímetro instalado entre la bomba sumergible y el tanque, lo cual permite saber el flujo bombeado en tiempo real en Litros/hora.

Gracias a otro caudalímetro instalado a la salida del tanque, es posible estimar con precisión la cantidad de agua disponible en cada momento, simplemente conociendo el volumen total del tanque (2.000 litros). Los datos de autonomía son calculados utilizando el consumo promedio de la vivienda y los datos del porcentaje de llenado en tanque.

16.6.3. Consumo Eléctrico

Los datos de consumo eléctrico fueron tomados de una vivienda convencional con 3 habitantes en la zona de Jaén España, de esta manera se puede representar de forma aproximada los hábitos y patrones típicos. Se realizaron los cálculos pertinentes de conversión de unidades y ajustes necesarios para linear los datos de consumo a los datos de producción solar, de esta forma es posible compararlos en tiempo real.

Esta información es integrada en el tablero y visualizada en forma de series temporales, con datos históricos de los últimos 7 días, datos actuales y un pronóstico de los próximos 14 días.

16.6.4. Sistema de Almacenamiento

En el sistema de almacenamiento el controlador calcula la diferencia entre la producción solar y el consumo eléctrico, esto permite identificar si hay exceso o déficit de energía para la vivienda. Si la producción solar supera al consumo, el excedente se destina a la carga de baterías y al bombeo de agua al tanque de reserva. En este caso la carga de baterías tiene prioridad.

Si el consumo es mayor a la producción, el déficit de energía se cubre con las baterías, y el tablero calcula el porcentaje de descarga acorde al consumo realizado. Con los datos de energía almacenada y el historial de descargas, el tablero tiene la capacidad de mostrar en tiempo real el estado de carga de las baterías, y estima la autonomía en días y horas.

16.6.5. Estado actual de la vivienda

La sección muestra información meteorológica diaria como temperatura, salida y puesta del sol, velocidad y dirección del viento y otras condiciones atmosféricas. También incluye datos actuales del recurso solar (kWh/m2), dato clave para la estimación en tiempo real de producción solar.

Adicionalmente presenta un cuadro de texto el cual es un mensaje dinámico (cambiando según las circunstancias), mostrando el estado actual de la vivienda, explicando en forma resumida la operación actual de todos los sistemas conectados.

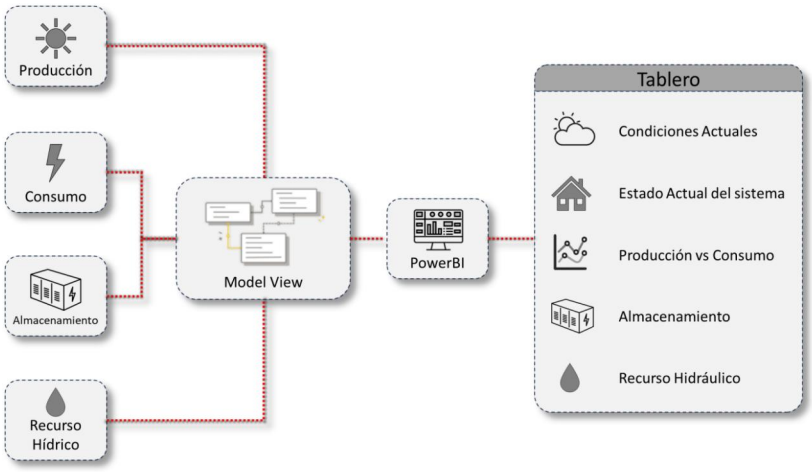


Figura 15. Esquema de integración de datos con PowerBI, Power Query y visualizaciones - Fuente: Propia

16.6.6. Diseño del tablero

El primer módulo muestra las condiciones actuales, es decir condiciones meteorológicas y estado actual de la vivienda. El segundo modulo representa la producción solar y consumo, comparando datos históricos, actuales y el pronóstico de la correlación entre consumo energético y producción solar disponible.

El recurso hídrico se muestra en el tercer módulo con datos del estado de la bomba (on/off), caudal actual, volumen de agua en tanque, porcentaje de llenado y la autonomía en días y horas.

Por último, el cuarto modulo indica la carga diaria de las baterías, su nivel en porcentaje, alertas de carga y descarga y autonomía en días y horas.

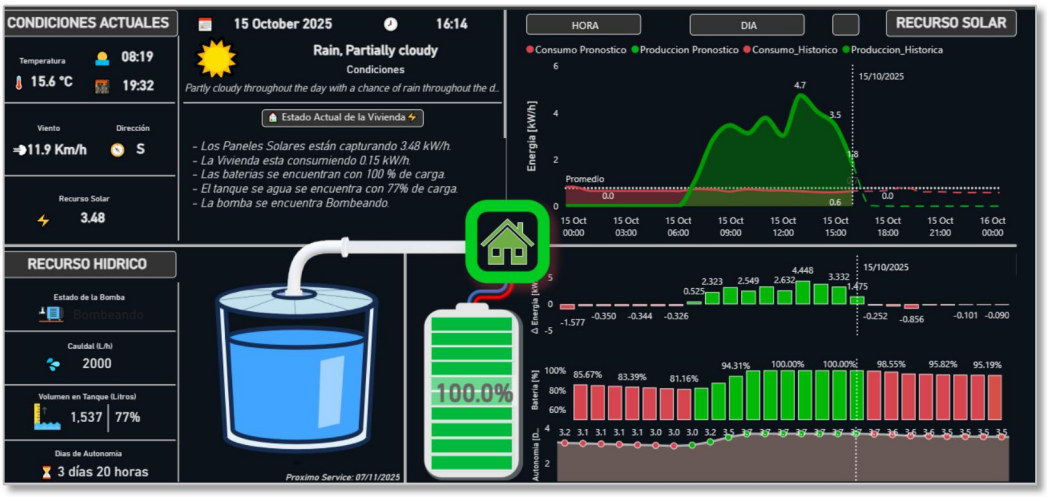


Figura 16. Tablero en tiempo real – Interfaz de usuario. Utilizar el enlace para verlo en tiempo real.Fuente: Propia.

Utilizar el enlace para ver el tablero interactivo en tiempo real -> 🔗.

16.6.7. Aspectos técnicos del desarrollo del tablero

El desarrollo del tablero se realizó utilizando Microsoft PowerBI integrando la herramienta Power Query en lenguaje de programación M.

```
let
    url = "https://weather.visualcrossing.com/VisualCrossingWebServices/rest/services/timeline/38.287176,-2.583612/last6days/next14days?unitGroup=us&key=UBHYEBP6QY38BP999N274D3ZA&
        contentType=json",

    Origen = Json.Document(Web.Contents(url)),

    #"Convertida en tabla" = Table.FromRecords({Origen}),
    #"Se expandió stations" = Table.ExpandRecordColumn(#"Convertida en tabla", "stations", {"EGKK", "E4787", "D1286", "C8254", "EGLC", "EGMD", "EGKB"}, {"stations.EGKK", "stations.E4787",
        "stations.D1286", "stations.C8254", "stations.EGLC", "stations.EGMD", "stations.EGKB"}),
    #"Se expandió stations.EGKK" = Table.ExpandRecordColumn(#"Se expandió stations", "stations.EGKK", {"distance", "latitude", "longitude", "useCount", "id", "name", "quality", "contribution"}
        , {"stations.EGKK.distance", "stations.EGKK.latitude", "stations.EGKK.longitude", "stations.EGKK.useCount", "stations.EGKK.id", "stations.EGKK.name", "stations.EGKK.quality",
        "stations.EGKK.contribution"}),
    #"Se expandió stations.E4787" = Table.ExpandRecordColumn(#"Se expandió stations.EGKK", "stations.E4787", {"distance", "latitude", "longitude", "useCount", "id", "name", "quality",
        "contribution"}, {"stations.E4787.distance", "stations.E4787.latitude", "stations.E4787.longitude", "stations.E4787.useCount", "stations.E4787.id", "stations.E4787.name",
        "stations.E4787.quality", "stations.E4787.contribution"}),
    #"Se expandió stations.D1286" = Table.ExpandRecordColumn(#"Se expandió stations.E4787", "stations.D1286", {"distance", "latitude", "longitude", "useCount", "id", "name", "quality",
    #"Tipo cambiado" = Table.TransformColumnTypes(#"Se expandió currentConditions",{{"queryCost", Int64.Type}, {"latitude", type number}, {"longitude", type number}, {"resolvedAddress", type
        text}, {"address", type text}, {"timezone", type text}, {"tzoffset", Int64.Type}, {"description", type text}, {"days", type any}, {"alerts", type any}, {"stations.EGKK.distance",
        Int64.Type}, {"stations.EGKK.latitude", type number}, {"stations.EGKK.longitude", type number}, {"stations.EGKK.useCount", Int64.Type}, {"stations.EGKK.id", type text},
        {"stations.EGKK.name", type text}, {"stations.EGKK.quality", Int64.Type}, {"stations.EGKK.contribution", Int64.Type}, {"stations.E4787.distance", Int64.Type},
        {"stations.E4787.latitude", type number}, {"stations.E4787.longitude", type number}, {"stations.E4787.useCount", Int64.Type}, {"stations.E4787.id", type text}, {"stations.E4787.name",
        type text}, {"stations.E4787.quality", Int64.Type}, {"stations.E4787.contribution", Int64.Type}, {"stations.D1286.distance", Int64.Type}, {"stations.D1286.latitude", type number},
        {"stations.D1286.longitude", type number}, {"stations.D1286.useCount", Int64.Type}, {"stations.D1286.id", type text}, {"stations.D1286.name", type text}, {"stations.D1286.quality",
        Int64.Type}, {"stations.D1286.contribution", Int64.Type}, {"stations.C8254.distance", Int64.Type}, {"stations.C8254.latitude", type number}, {"stations.C8254.longitude", type number},
        {"stations.C8254.useCount", Int64.Type}, {"stations.C8254.id", type text}, {"stations.C8254.name", type text}, {"stations.C8254.quality", Int64.Type}, {"stations.C8254.contribution",
        Int64.Type}, {"stations.EGLC.distance", Int64.Type}, {"stations.EGLC.latitude", type number}, {"stations.EGLC.longitude", type number}, {"stations.EGLC.useCount", Int64.Type},
        {"stations.EGLC.id", type text}, {"stations.EGLC.name", type text}, {"stations.EGLC.quality", Int64.Type}, {"stations.EGLC.contribution", Int64.Type}, {"stations.EGMD.distance",
        Int64.Type}, {"stations.EGMD.latitude", type number}, {"stations.EGMD.longitude", type number}, {"stations.EGMD.useCount", Int64.Type}, {"stations.EGMD.id", type text},
        {"stations.EGMD.name", type text}, {"stations.EGMD.quality", Int64.Type}, {"stations.EGMD.contribution", Int64.Type}, {"stations.EGKB.distance", Int64.Type}, {"stations.EGKB.latitude",
         type number}, {"stations.EGKB.longitude", type number}, {"stations.EGKB.useCount", Int64.Type}, {"stations.EGKB.id", type text}, {"stations.EGKB.name", type text},
        {"stations.EGKB.quality", Int64.Type}, {"stations.EGKB.contribution", Int64.Type}, {"currentConditions.datetime", type time}, {"currentConditions.datetimeEpoch", Int64.Type},
        {"currentConditions.temp", type number}, {"currentConditions.feelslike", type number}, {"currentConditions.humidity", type number}, {"currentConditions.dew", type number},
        {"currentConditions.precip", Int64.Type}, {"currentConditions.precipprob", Int64.Type}, {"currentConditions.snow", Int64.Type}, {"currentConditions.snowdepth", Int64.Type},
        {"currentConditions.preciptype", type any}, {"currentConditions.windgust", type number}, {"currentConditions.windspeed", type number}, {"currentConditions.winddir", Int64.Type},
        {"currentConditions.pressure", Int64.Type}, {"currentConditions.visibility", type number}, {"currentConditions.cloudcover", Int64.Type}, {"currentConditions.solarradiation",
        Int64.Type}, {"currentConditions.solarenergy", Int64.Type}, {"currentConditions.uvindex", Int64.Type}, {"currentConditions.conditions", type text}, {"currentConditions.icon", type
        text}, {"currentConditions.stations", type any}, {"currentConditions.source", type text}, {"currentConditions.sunrise", type time}, {"currentConditions.sunriseEpoch", Int64.Type},
        {"currentConditions.sunset", type time}, {"currentConditions.sunsetEpoch", Int64.Type}, {"currentConditions.moonphase", type number}}),
    #"Se expandió days" = Table.ExpandListColumn(#"Tipo cambiado", "days"),
    #"Se expandió days1" = Table.ExpandRecordColumn(#"Se expandió days", "days", {"datetime", "datetimeEpoch", "tempmax", "tempmin", "temp", "feelslikemax", "feelslikemin", "feelslike", "dew",
        "humidity", "precip", "precipprob", "precipcover", "preciptype", "snow", "snowdepth", "windgust", "windspeed", "winddir", "pressure", "cloudcover", "visibility", "solarradiation",
        "solarenergy", "uvindex", "severerisk", "sunrise", "sunriseEpoch", "sunset", "sunsetEpoch", "moonphase", "conditions", "description", "icon", "stations", "source", "hours"},
        {"days.datetime", "days.datetimeEpoch", "days.tempmax", "days.tempmin", "days.temp", "days.feelslikemax", "days.feelslikemin", "days.feelslike", "days.dew", "days.humidity",
        "days.precip", "days.precipprob", "days.precipcover", "days.preciptype", "days.snow", "days.snowdepth", "days.windgust", "days.windspeed", "days.winddir", "days.pressure",
        "days.cloudcover", "days.visibility", "days.solarradiation", "days.solarenergy", "days.uvindex", "days.severerisk", "days.sunrise", "days.sunriseEpoch", "days.sunset",
        "days.sunsetEpoch", "days.moonphase", "days.conditions", "days.description", "days.icon", "days.stations", "days.source", "days.hours"}),
    #"Changed Type" = Table.TransformColumnTypes(#"Se expandió days1",{{"days.solarenergy", type number}})
in
    #"Changed Type"
```

Figura 17. Ejemplo código M. Query "00_API_BASE" conexión a la API Visual Crossing - Fuente: Propia.

16.6.8. Técnicas más relevantes utilizadas

- Conexión a la API - Visual Crossing: Web.Contents, Json.Document

- Conexión a datos: Csv.Document, Excel.Workbook
- Limpieza básica: Table.PromoteHeaders, Table.TransformColumnNames, Text.Trim, Table.SelectColumns, Table.RemoveColumns
- Cambio de formatos: Table.TransformColumnTypes, Percentage.Type
- Fechas dinámicas: Date.From, Date.AddDays, DateTime.LocalNow, Time.From.
- Uniones: Table.NestedJoin y Table.ExpandTableColumn
- Agregaciones: Table.Group, List.Sum, List.Average
- Reglas condicionales: Reglas “if”, ”then”, “else”

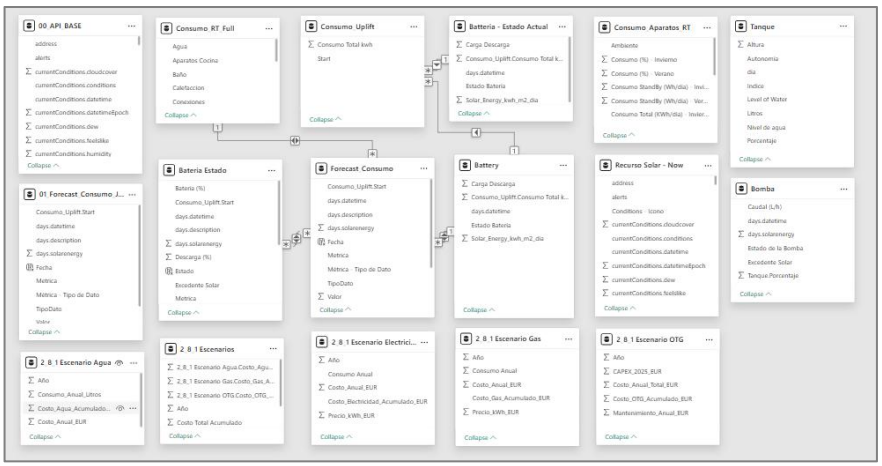


Figura 18. PowerBI – Model View - Esquema de tablas y conexiones - Fuente: Propia.

16.7. Adaptabilidad a cambios en la ocupación de la vivienda

El sistema tiene la capacidad de detectar y adaptarse a variaciones en la ocupación de la vivienda, ya sea por un seteado manual del usuario, o por la detección automática en base al consumo y actividad (consumo eléctrico, consumo de agua). En el segundo caso, el tablero interactivo lanza un mensaje de detección.

De aumentar el número de ocupantes en la vivienda, el sistema provee un aumento en la demanda, el cual es reflejado en el pronóstico, actualizando el escenario. De esta forma, ajusta los parámetros operativos para mantener la estabilidad del sistema sin comprometer los hábitos de consumo. De forma análoga, de existir una reducción en el número de ocupantes o incluso ausencia de ocupantes, el sistema recalcula los escenarios entrando en modo “Baja demanda” o “Stand by”.

16.8. Estrategias de eficiencia energética para la reducción de la demanda

El éxito del concepto de esta vivienda autosustentable “off-grid”, no solo depende que tan precisos sean los modelos de dimensionamiento, pronósticos y lógicas de la operación del sistema. Sino también, implica un cambio abrupto en el hábito del consumo de los habitantes, una re-educación de la importancia de cada recurso, y de entender y concientizar de las consecuencias del exceso en el consumo de dichos recursos.

Es importante generar un sistema de generación y almacenamiento de energía optimizado, en conjunto con la promoción de una cultura de uso responsable de los recursos. Por esto, herramientas inteligentes como un tablero interactivo en el garaje y la capacidad de obtener la información en tiempo real en el teléfono con conceptos claves para que el usuario comprenda los datos reales de su consumo, y el impacto directo de sus acciones diarias sobre la autonomía de la vivienda.

16.9. Estrategias clave:

- **Gestión sensata de los picos de consumo:** Concientizar el uso simultaneo de electrodomésticos de alta potencia durante horas de bajo recurso solar y alta demanda. El sistema sugiere horarios óptimos basados en pronósticos solares.
- **Uso racional del agua:** Se fomenta el bajo consumo del agua como recurso no renovable (duchas breves, reutilización de aguas grises, optimización del riego) aprovechando los excedentes energéticos para el bombeo diurno y almacenamiento en el tanque.
- **Conciencia sobre la autonomía energética:** El tablero interactivo promueve la educación en el uso sostenible de la energía, mostrando documentales y tutoriales para entender que en un entorno off-grid cada acción tiene una consecuencia directa. Ayudando a reducir la demanda no solo alarga la vida útil de las baterías y del sistema, sino que refuerza la independencia energética y el impacto ambiental positivo del proyecto.
- **Tablero interactivo abierto a todos los ocupantes:** La información se comparte a todos los ocupantes de la vivienda, los usuarios pueden visualizar alertas y recomendaciones automáticas, promoviendo la toma de decisiones informadas y el desarrollo de hábitos energéticamente responsables.

16.10. Modo de operación en estado de emergencia

Durante el día, los paneles solares generan electricidad que, en primer lugar, se destina a los consumos críticos, como la iluminación, el refrigerador, equipos médicos y las comunicaciones. Lo que sobra se almacena en baterías, asegurando que haya energía disponible durante la noche o en momentos sin sol.

El controlador evalúa constantemente los recursos disponibles de la vivienda, calculando en tiempo real la autonomía. Este cálculo es clave ya que utiliza los recursos y consumos reales, y al mismo tiempo calcula 3 escenarios (Optimista, Normal, Pesimista) según el pronóstico de los recursos disponibles. Es decir, si el pronóstico indica 5 días sin recurso solar, la casa enviará una alerta al usuario para activar el modo “Ahorro”, y de esta forma se reducirá el consumo (automatizado) de agua (menor presión en la red durante horas no esenciales) y electricidad (menor cantidad de lámparas activas, apagado de lavavajillas, apagado de TV secundaria, disminuyendo la temperatura de la calefacción).

17.Evaluación económica (inversión, financiación, flujos de caja, rentabilidad)

El objetivo principal de este apartado valorar con fines orientativos y de forma preliminar la viabilidad económica de implementar un sistema fotovoltaico autónomo (off-grid) en la vivienda propuesta, además de integrar otros sistemas que mejoren la eficiencia energética. Para ello, se llevó a cabo una evaluación detallada de los costos de inversión inicial, los ahorros operativos que se esperan, calculando indicadores financieros clave como el retorno de la inversión inicial comparado a escenarios de la vivienda conectada a la red. Todo esto con el fin de determinar la rentabilidad y el atractivo de la inversión a largo plazo.

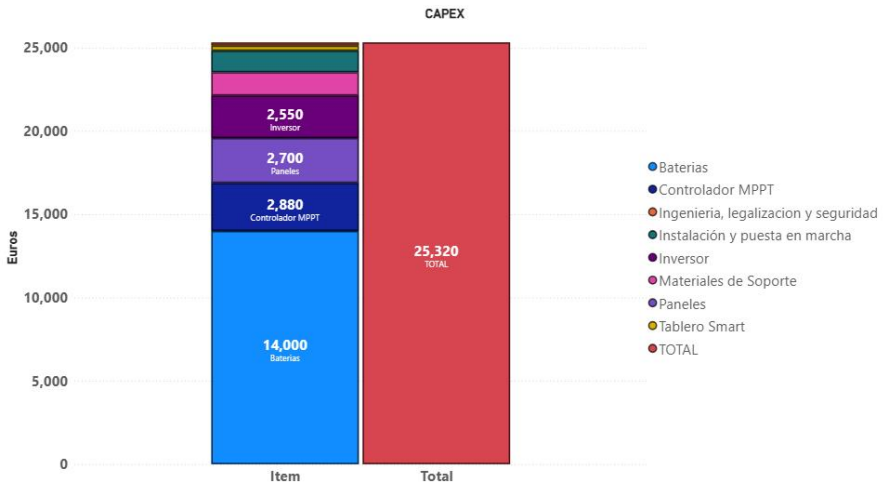


Figura 19. CAPEX - Fuente: Propia.

El sistema fotovoltaico comienza con la evaluación de la inversión inicial necesaria para adquirir los equipos clave. Basándonos en los precios de mercado de inversores, controladores de carga, bancos de baterías y módulos fotovoltaicos, el costo total de implementación se estima en alrededor de €25.320,0. Es importante destacar que la mayor parte de este gasto se destina al sistema de acumulación, ya que las baterías representan más del 50% de la inversión total.

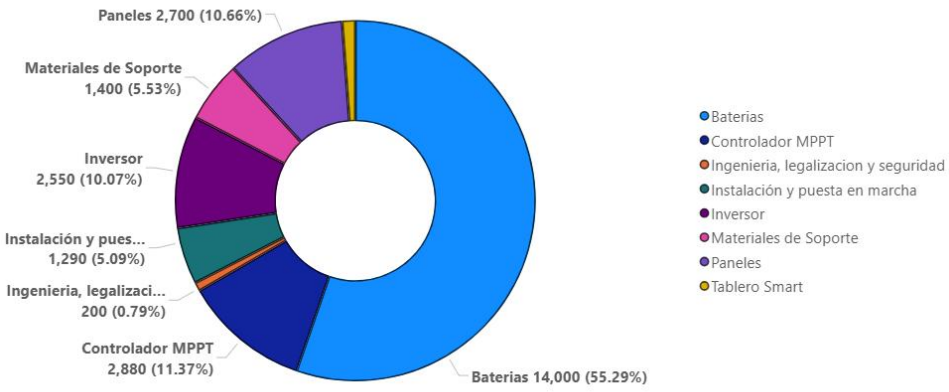


Figura 20. CAPEX (%) - Fuente: Propia.

La inversión inicial incluye la compra de los componentes clave que son necesarios para que el sistema fotovoltaico off-grid funcione correctamente.

La inversión comprende todos los componentes necesarios para garantizar el funcionamiento autónomo de la vivienda: módulos fotovoltaicos, inversor híbrido, sistema de almacenamiento, estructura de soporte, sistema de gestión y montaje.

En la siguiente tabla se detallan los costes estimados para una instalación de **11 kWp** con almacenamiento de **54,6 kWh**.

Item	Cantidad	Costo (€) / Unidad	Costo Total
Paneles	18	150	2,700
Controlador MPPT	6	480	2,880
Inversor	3	850	2,550
Baterias	2	7,000	14,000
Ingenieria, legalizacion y seguridad	1	250	200
Tablero Smart	1	300	300
Materiales de Soporte	1	1,450	1,400
Instalación y puesta en marcha	1		1,290
TOTAL			25,320

Tabla 5. Detalle de costes estimados para el calculo de CAPEX. Fuente: Propia.

Por tanto, la inversión inicial total se estima en €25.320, cifra que incluye el suministro de equipos, instalación y configuración del sistema completo.

Además, es importante tener en cuenta que llevar a cabo este proyecto implica hacer adaptaciones en la vivienda. Esto incluye la instalación de un sistema de calefacción por suelo radiante, que será alimentado por una bomba de calor de alta eficiencia. Aunque esta tecnología puede tener un costo

inicial elevado, su implementación ayudará a reducir considerablemente el consumo energético en general, mejorando el rendimiento del sistema fotovoltaico y los costos operativos a largo plazo.

17.1. Costes de operación y mantenimiento

El sistema está diseñado para requerir un mantenimiento mínimo, centrado en la limpieza de paneles, comprobación del inversor, control de conexiones y actualización del software de gestión energética. El coste anual medio de mantenimiento se estima en 100 €, lo que equivale a un 0,37 % de la inversión total, valor muy bajo en comparación con instalaciones convencionales conectadas a la red.

17.2. Financiación del proyecto

Se plantea un esquema de financiación mixta, combinando recursos propios y un préstamo verde destinado a proyectos de autoconsumo:

- **Aportación propia:** 40 % del capital → 10 848 €
- **Financiación externa:** 60 % → 16 272 €

Condiciones del préstamo: interés anual del 4 %, plazo de 10 años, pagos anuales iguales.

La cuota anual del préstamo se calcula con la fórmula de anualidad:

$$A = P\,x\,\frac{i(1+i)n}{(1+i)n\,-\,1}$$

Donde:

P=16272P; i=0,04; n=10:

A=16272 × 0,1233 = **2006€/año**

Por tanto, el pago anual durante los primeros diez años será de aproximadamente €2.000**.**

17.3. Flujos de caja

La vivienda propuesta elimina por completo el gasto en energía eléctrica de red.
Considerando un coste medio de electricidad en España de **0,24 €/kWh** (Trading Economics, s.f.) , el ahorro anual se calcula como:

$$Ahorro = 4540 \times 0{,}24 = \mathbf{1089€/año}$$

Descontando los costes de mantenimiento, el flujo neto anual asciende a **989 €**.
En la siguiente tabla se resumen los flujos de caja esperados:

Año	Inversión (€)	Mantenimiento (€)	Ahorro (€)	Flujo neto (€)
0	-27 120	0	0	-27 120
1–10	0	-100	+1 089	989
11–25	0	-100	+1 089	989

Tabla 6. Flujo de Caja Orientativo. Fuente: Propia.

Los ahorros generados permiten recuperar la inversión a medio plazo, situando un periordo de compensación de la inversión en alrededor del año 9, momento a partir del cual la instalación empieza a generar beneficios netos.

17.4. Conclusiones económicas

Los resultados confirman que la vivienda autosuficiente es económicamente viable y rentable en el largo plazo. Aunque el desembolso inicial es superior al de una conexión convencional, la eliminación del gasto eléctrico y la estabilidad frente a la variación de tarifas justifican la inversión.

En síntesis:

- Se alcanza el periodo de compensación de inversión en menos de diez años.
- Los costes anuales de mantenimiento son mínimos.
- El ahorro acumulado a 25 años supera ampliamente la inversión inicial.

Adicionalmente, la posibilidad de acceder a subvenciones europeas o deducciones fiscales vinculadas al autoconsumo renovable podría reducir el periodo de recuperación a 6–7 años, mejorando la rentabilidad global.

En conclusión, el modelo off-grid propuesto no solo garantiza la independencia energética de la vivienda, sino que representa una inversión sólida, sostenible y económicamente competitiva frente a las soluciones residenciales convencionales.

17.5. Visualizaciones del análisis económico comparativo a 25 años, incluyendo inversión inicial, retorno, ahorro y escenarios

Uno de los grandes beneficios económicos del sistema que proponemos es la eliminación de la dependencia de la red eléctrica convencional. Esto se traduce en un ahorro considerable en gastos

de servicios al largo plazo para la vivienda. En la actualidad, el costo promedio mensual en gastos de electricidad y calefacción es entre €170 y €250 , y hemos visto que, en los últimos 10 años, los precios han aumentado entre un 1% y un 2.5% anualmente tanto en el sector residencial como en el comercial. Este patrón de incremento, junto con los costos de transporte de la energía, resalta la importancia de invertir en una fuente de energía autosuficiente.

Se estima que, teniendo en cuenta la inversión inicial, la vivienda alcanzaría el punto de paridad de costes en el noveno año. Esto significa que, desde dicho momento, la inversión inicial ya ha sido abonada, y los años restantes presentan tarifa €0, con excepción del costo de mantenimiento de alrededor de €100 anuales.

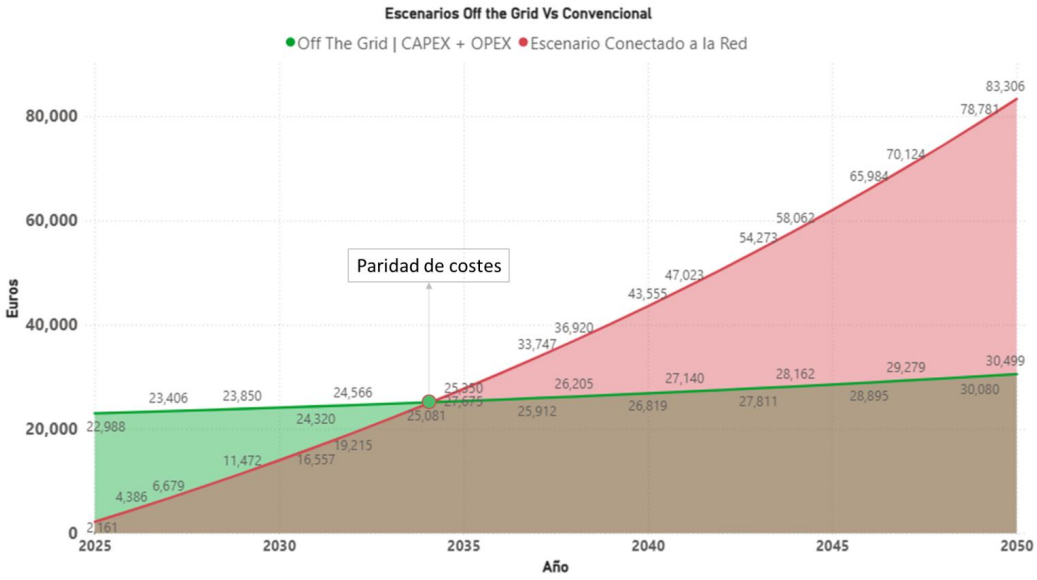


Figura 21. Escenario Off the Grid VS Convencional conectado a la red - Fuente: Propia

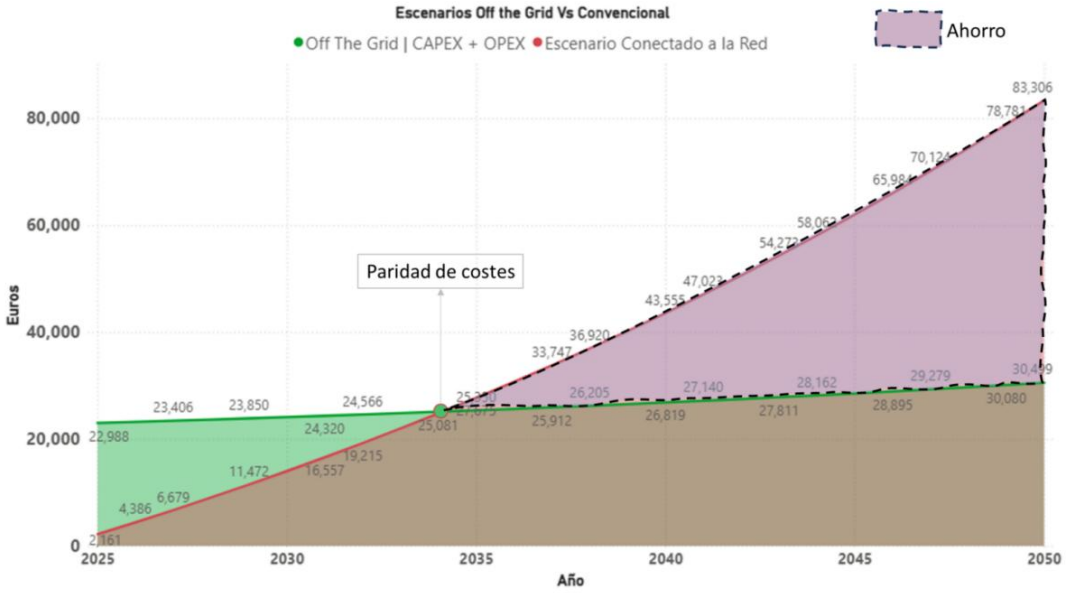


Figura 22. CAPEX - Ahorro - Fuente: Propia

18.Análisis DAFO

FORTALEZAS	DEBILIDADES
• Alta irradiación solar anual (≈5,85 kWh/m²·día), que favorece la producción fotovoltaica estable durante todo el año. • Autonomía energética total: generación, almacenamiento y control inteligente sin conexión a red. • Uso de tecnología eficiente (módulos PERC, baterías $LiFePO_4$, inversor híbrido), con alta fiabilidad y durabilidad. • Reducción total de emisiones directas de CO_2 y contribución a la sostenibilidad ambiental. • Sistema modular, ampliable y adaptable a futuras demandas energéticas (bombeo, vehículo eléctrico).	• Elevado coste inicial de inversión para equipos, instalación y almacenamiento energético. • Dependencia de equipos electrónicos (inversores, controladores, sensores) que requieren mantenimiento especializado. • Limitada autonomía de almacenamiento (≈3 días), vulnerable ante periodos prolongados sin radiación solar. • Complejidad técnica en la gestión y coordinación de subsistemas eléctricos, térmicos e hidráulicos. • Necesidad de espacio físico considerable para los paneles y el banco de baterías.
OPORTUNIDADES	**AMENAZAS**
• Existencia de programas de incentivos europeos y nacionales que fomentan la transición energética y el autoconsumo renovable. • Avances tecnológicos que incrementan la eficiencia y reducen el coste de módulos fotovoltaicos y baterías. • Creciente demanda de viviendas sostenibles y autosuficientes, lo que eleva el valor del inmueble. • Expansión de comunidades energéticas locales que favorecen la cooperación y resiliencia rural. • Mayor conciencia ambiental y social sobre la importancia de reducir emisiones y dependencia energética.	• Variabilidad climática (nubosidad prolongada o menor radiación) que puede reducir la generación prevista. • Aumento en los precios de materiales o escasez de componentes electrónicos clave. • Posibles cambios en las normativas de autoconsumo o fiscalidad energética. • Rápida obsolescencia tecnológica y necesidad de actualización de software y componentes. • Riesgos ambientales derivados de la gestión de residuos de baterías y equipos al final de su vida útil.

Figura 23. Análisis DAFO del proyecto. Fuente: Propia.

19. Resultados

El proyecto logró demostrar que una vivienda completamente autosuficiente es técnicamente viable, y también económicamente viable, sin dependencia de la red eléctrica usando una combinación de paneles solares, baterías, y gestión inteligente del consumo.

Los números obtenidos del diseño revelan que los paneles solares planificados suplen toda la energía anual que la casa necesita, alrededor de 4.000 kWh/año para la electricidad y 445 kWh/año para calefacción, con un consumo promedio de agua de 130 litros por persona cada día. La irradiación solar promedio anual en Jaén, unos 5,85 kWh/m²/día, aseguro una buena producción incluso cuando el sol no brilla tanto, ofreciendo una independencia energética por arriba del 95%.

En cuanto al funcionamiento, el garaje funciona como el cerebro del sistema energético, incluyendo la pequeña central que controla el flujo de energía y el uso del agua.
El tablero interactivo mostró, en tiempo real, el nivel de producción, el estado de las baterías, y la eficiencia del consumo. Esto optimizó la administración diaria y bajó la demanda innecesaria.

En modos de emergencia, el sistema da prioridad a los consumos críticos; como iluminación, refrigeración, comunicaciones y equipos médicos. Así, logra mantener la casa funcionando aun sin sol por días, por su gran capacidad de almacenaje.

El análisis económico, extendiéndose por 25 años, reveló un ahorro acumulado muy considerable, en comparación con una vivienda convencional conectada, por la red eléctrica. A pesar de una inversión inicial alta, la propuesta alcanza su punto de equilibrio económico, o sea el "payback", durante el noveno año de funcionamiento, momento en el cual el costo energético neto de la vivienda se vuelve casi nulo, el mantenimiento está estimado en alrededor de 100 € cada año.

Además, el sistema protege contra el aumento gradual de las tarifas de la electricidad, digamos, entre 1 y 2,5 % cada año, concretando una baja del gasto energético del 100 % a largo plazo. Desde una perspectiva ambiental, el modelo impide la emisión de, por ahí, 1,3 toneladas de CO_2 anualmente, significando una disminución de más del 90 % frente a una vivienda convencional, esto demuestra el potencial del diseño para colaborar activamente con los metas de descarbonización en el sector residencial. Finalmente, las pruebas de funcionamiento del modo inteligente confirmaron la capacidad del sistema para ajustarse a variados perfiles de ocupación y condiciones climáticas, gracias al uso de predicciones solares y algoritmos de control predictivo.

20.Comparación entre hipótesis y resultados

Inicialmente, la hipótesis central del estudio postuló que una casa unifamiliar tendría la posibilidad de ser altamente autosuficiente y resiliente energéticamente. Esto a través de la conjunción de un sistema fotovoltaico con almacenamiento de batería sofisticado, además una gestión inteligente que se basó en los pronósticos meteorológicos y algoritmos de control.

Los resultados finales confirman, efectivamente, la validez de dicha hipótesis. El sistema desarrollado comprobó ser técnicamente apto, así cumplió con cubrir la totalidad de las necesidades energéticas domésticas como electricidad, climatización y bombeo de agua, conservando una autonomía media de un 95–100 % durante casi todo el año.

Desde una perspectiva económica, el modelo off-grid corroboró la hipótesis sobre la competitividad, en contraste con una vivienda corriente conectada a la red. Si bien la inversión inicial resultó superior, el análisis a 25 años desveló un ahorro acumulado muy grande, más del 70 % en los costes energéticos, obteniendo un retorno de la inversión con un payback estimado en unos 9 años. Desde ese momento, costos de operación y mantenimiento, casi insignificantes, esto afianza la viabilidad económica del sistema.

Ambientalmente, los logros sobrepasaron lo esperado, reemplazando combustibles fósiles con energía solar y aerotermia redujo las emisiones de CO_2 en más del 90%, aproximándose al balance anual neutral. Esta vivienda aislada no solo es eficiente a nivel individual, sino un modelo a copiar que apoya los objetivos europeos de descarbonización, esto es verdad.

Además, el manejo inteligente del sistema verifico la idea de flexibilidad operativa totalmente. El

control con predicción meteorológica y la detección de patrones de consumo permitieron adaptar la generación y el almacenamiento en tiempo real, lo que asegura un suministro estable aún en caso de variaciones de ocupación o condiciones desfavorables.

En resumen, al cotejar la hipótesis con los hallazgos, salta a la vista que el modelo de vivienda off-grid concebido es técnicamente viable, resultando económicamente ventajoso y además ambientalmente perdurable, lo que corrobora la posibilidad de obtener autosuficiencia energética, a través de una concepción holística que incluye diseño, tecnología y manejo.

21. Justificación del porcentaje de transformación de energías convencionales a energías renovables conseguido

Este proyecto logro una transformación casi total, de consumir energía tradicional por fuentes renovables, se calculó un reemplazo de cómo el 97% comparándolo con una casa similar conectada a la red eléctrica. Ese porcentaje es el resultado de la relación entre la energía que generó anualmente el sistema fotovoltaico y toda la demanda de la casa, considerando los hábitos de cómo se consume la electricidad, calefacción, agua caliente sanitaria y el bombeo.

La generación fotovoltaica, produjo cerca de 4.600 kWh anuales, cubriendo por completo la necesidad eléctrica doméstica, que ronda los 4.000 kWh por año, permitiendo además excedentes para el bombeo de agua y un apoyo para el aire. El sistema de aerotermia también demostró ser super eficiente, más de 300% (COP aprox. 3,5), bajando bastante la necesidad de energía eléctrica para calentar y el agua, subiendo la autosuficiencia general del modelo.

Un 3 % dependiente, no renovable enérgicamente, todavía está conectado al consumo auxiliar del sistema, es necesario en momentos concretos; o sea, en épocas de muy poca luz solar o mantenimiento de las baterías. Igualmente, este consumo podría ser equilibrado, si se agregan fuentes suplementarias, por ejemplo, micro eólica, o más almacenamiento térmico, que facilita la transición a un modelo cien por ciento renovable.

En comparación, esta transición representa una disminución del 96 % en las emisiones de CO_2 y una caída total, del cien por cien, en el empleo directo de combustibles fósiles, dado que la casa ya no utiliza gas, ni suministro eléctrico externo. Este logro confirma las metas iniciales del proyecto, exhibiendo el auténtico potencial de la tecnología fotovoltaica, fusionada con aerotermia y almacenamiento inteligente, como el rumbo hacia la descarbonización en el sector residencial.

En resumen, el porcentaje de cambio conseguido demuestra que el modelo off-grid no solo es autónomo y eficiente, sino también respetuoso con el medio ambiente y económicamente viable, mostrando que la conversión a un hogar cien por ciento renovable es factible, técnica y económicamente, con las tecnologías de hoy.

22.Consideraciones finales

El desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster permitió demostrar que la autosuficiencia energética en el ámbito residencial es técnica y económicamente viable cuando se integran de manera coherente tecnologías renovables, almacenamiento y gestión inteligente de la energía. El modelo de vivienda *off-grid* propuesto combina generación fotovoltaica, aerotermia, almacenamiento en baterías y control predictivo, logrando un equilibrio sostenible entre confort, autonomía y eficiencia.

Desde el punto de vista técnico, el sistema diseñado garantiza la cobertura completa de las necesidades energéticas anuales de una vivienda unifamiliar ubicada en Jaén, con una autonomía superior al 95 %. El comportamiento del conjunto fotovoltaico y de la aerotermia se mantuvo estable incluso en periodos de baja radiación solar, validando la capacidad del sistema para mantener el suministro sin conexión a la red eléctrica. La integración del garaje modular como micro central energética aportó un enfoque innovador y funcional, concentrando la inteligencia operativa y los elementos de almacenamiento de manera segura y optimizada.

En el ámbito económico, los resultados confirmaron que, a pesar de una inversión inicial mayor, el modelo *off-grid* presenta costes nivelados de energía (LCOE) significativamente inferiores a los del escenario convencional. El análisis financiero a 25 años demostró un retorno de inversión (payback) cercano a los 9 años, a partir del cual los costes de operación se reducen a valores marginales, consolidando un ahorro total superior al 70 % frente al modelo conectado a la red.

En cuanto al impacto ambiental, la sustitución de energías convencionales por renovables redujo las emisiones de CO_2 en más del 90 %, eliminando la dependencia de combustibles fósiles y favoreciendo la neutralidad de carbono. Este resultado no solo refuerza el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, sino que también posiciona la vivienda *off-grid* como un referente replicable para proyectos de transición energética en el sector residencial.

Finalmente, desde una perspectiva estratégica y social, el proyecto aporta una visión integral y adaptable del futuro de la vivienda sostenible. La incorporación de inteligencia artificial y de sistemas de monitorización en tiempo real permite optimizar recursos, anticipar la demanda y adaptar el consumo según condiciones meteorológicas o de ocupación, lo que promueve una nueva forma de habitar más consciente, eficiente y resiliente.

En síntesis, la vivienda *off-grid* planteada representa una síntesis práctica de innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica, confirmando que la independencia energética doméstica ya no es una utopía, sino una realidad alcanzable con las herramientas actuales.

22.1. Final considerations

This Master's Thesis demonstrates the technical and economic feasibility of a fully off-grid residential dwelling, designed to operate independently from conventional electricity networks. The proposed system integrates solar photovoltaic generation, aerothermal heating, advanced battery storage, and intelligent management algorithms capable of predicting energy demand and optimizing resources in real time.

From the technical perspective, the hybrid renewable configuration achieves an annual energy autonomy of over 95%, ensuring continuous supply even under low-solar-radiation conditions. Economically, the system proves to be cost-competitive, reaching a payback period of around nine years and providing substantial long-term savings compared to a grid-connected household.

Environmentally, the design contributes to a reduction of more than 90% in CO_2 emissions, fully eliminating fossil fuel dependence and aligning with the European Union's decarbonization goals. Overall, this project validates the potential of off-grid housing as a sustainable, replicable, and future-oriented model for residential energy independence.

23.Futuras líneas de investigación y mejoras en la vivienda

El análisis actual señala muchas direcciones para la investigación, esto podría mejorar y desarrollar los hallazgos ya hechos, pensando en cuestiones de tecnología, del medio ambiente y de la sociedad. La evolución continua de las energías renovables, su almacenamiento, junto con la digitalización presentan muchas formas para mejorar el modelo independiente que proponemos.

- Uso de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático:
  Incorporar sistemas de inteligencia artificial (IA) podría hacer mucho más fácil optimizar el control predictivo de la vivienda, descubriendo pautas de uso y mejorando la generación y el ahorro de energía. Empleando algoritmos de aprendizaje automático, sería posible cambiar el funcionamiento del sistema, dependiendo del clima, del uso de la vivienda o de la previsión meteorológica, para reducir el consumo que no sea apropiado.

- Análisis del ciclo de vida (LCA) y huella de carbono:
  Un planteamiento fundamental implica estudiar el ciclo de vida de los componentes del sistema, incluyendo los paneles solares, las baterías, los materiales para la construcción y artefactos electrónicos, para conocer su impacto global en el medio ambiente.
  Este método abriría la puerta a identificar momentos claves en la construcción, transporte y fin

de la vida útil de los equipos, impulsando la construcción de hogares con un balance de carbono neutro o incluso positivo.

- Innovación en materiales y tecnologías de almacenamiento:
  El estudio de baterías de estado sólido, almacenamiento térmico o hidrógeno verde tiene el potencial, sí, para potenciar la autonomía del sistema, y de rebaja los costos de mantenimiento. Así mismo, la indagación en materiales fotovoltaicos nuevos, como los perovskitas híbridos, podría aumentar la eficiencia y la vida útil de los módulos solares.

- Digitalización, domótica y redes inteligentes:
  Es crucial la integración de la vivienda aislada en entornos digitales inteligentes, recurriendo a plataformas de domótica avanzada, Internet of Things (IoT) y blockchain pensando en la trazabilidad energética. Esas tecnologías podrían facilitar la comunicación entre viviendas autosuficientes, generando micro redes locales que compartan excedentes y gestionen conjuntamente la energía.

- Adaptación del modelo a diversos contextos geográficos y sociales:

- El modelo creado tiene la capacidad de extenderse a diferentes zonas climáticas, como a distintos tipos de viviendas, ya sean rurales, costeras o urbanas, supongo. Estudiar su rendimiento en condiciones adversas, piensen en zonas de poca luz solar o con alta demanda de calor, permitiría examinar su factibilidad y capacidad de ampliación, si se quiere. Además, usarlo en programas de vivienda social o en comunidades rurales necesitadas significaría un aporte directo al acceso universal a energía sustentable, que me parece bueno.

- Relación con sistemas de administración hídrica y reciclaje.
  Dado que el modelo considera el uso eficiente del agua, ampliar la investigación para incorporar sistemas de reciclaje, la captación de agua de lluvia y la depuración natural, se antoja sensato. Así, avanzaríamos hacia un prototipo de autonomía total, no solo en energía sino también en agua y el medio ambiente.

24.Bibliografía

Alonso Lorenzo, J. (2001). *Manual para instalaciones fotovoltaicas autónomas.* SunFields Europe.

Alvarez Yana, U., & Ojeda Aguilar, P. P. (2023). *Diseño de un aplicativo de cálculo de Sistemas Fotovoltaicos para la optimización del costo de instalación en el Perú.* Trujillo.

Aplicaciones Técnicas de la Energía, S.L. (ATERSA). (2024). *A-400M GS 108 — Datasheet (395–415 W).* Obtenido de Atersa Shop: https://atersa.shop/app/uploads/2021/12/EN-MU-M6M-6x18-M7-10BB-GS-ES-C-395W-415W-400M.pdf

Bello Pérez, M. (2025). *Optimización energética y desarrollo de un sistema de control inteligente para ACS y climatización en una vivienda de alta eficiencia en Tenerife.* Repositorio institucional de la Universidad de La Laguna.

BYD Company Limited. (s.f.). *Battery-Box Premium LVS — Datasheet (V1.1, ES).* BYD Company Limited.

Castellanos Contreras, J. U. (2025). *Propuesta de un modelo inteligente de generación de energía eléctrica aplicado en redes de sistemas híbridos de generación renovable no convencional.* Universidad EAN.

Crossing, V. (2025). *Visual Crossing*. Obtenido de https://www.visualcrossing.com/

Ember. (8 de abril de 2025). *Global Electricity Review 2025*. Obtenido de Ember: https://ember-energy.org/app/uploads/2025/04/Report-Global-Electricity-Review-2025.pdf

European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2025). *PVGIS — Photovoltaic Geographical Information System.* Obtenido de European Commission — JRC: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC14288

International Energy Agency (IEA). (2025). *Demand — Electricity 2025*. Obtenido de IEA (International Energy Agency): https://www.iea.org/reports/electricity-2025/demand

International Energy Agency (IEA). (24 de marzo de 2025). *Growth in global energy demand surged in 2024 to almost twice its recent average*. Obtenido de IEA (International Energy Agency): https://www.iea.org/news/growth-in-global-energy-demand-surged-in-2024-to-almost-twice-its-recent-average

International Energy Agency. (2001). *Things that go blip in the night: Standby power and how to limit it.* pARIS: OECD/IEA.

International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). (abril de 2025). *Snapshot of Global PV Markets 2025*. Obtenido de IEA PVPS (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme): https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets_2025.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA). (26 de marzo de 2025). *Renewable Capacity Highlights 2025*. Obtenido de IRENA (International Renewable Energy Agency): https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Highlights_2025.pdf

Junta de Andalucía, Consejería de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda. (2 de diciembre de 2022). *Decreto 550/2022, de 29 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de la Ley 7/2021, de 1 de diciembre, de impulso para la sostenibilidad del territorio de Andalucía*. Obtenido de Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA), nº 232: https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/inline-files/2022/12/Decreto%20550_2022_REGLAMENTO%20LISTA.pdf

Kigen, K. L. (2025). *Design and optimization of hybrid renewable energy systems with atmospheric water harvesting for sustainable off-grid living.* NTNU.

Pastrana, S., Luquez, S., Urrego, C., Bolaños, O., & Mayorga, A. (Noviembre de 2025). *YouTube*. Obtenido de Transformando el hogar - Viabilidad técnica económica de una vivienda Off - Grid: https://www.youtube.com/watch?v=LaLacGAs6ls

Romero Vargas, I. (2020). *Estudio de los sistemas de energía solar fotovoltaica con conexión aislada (Off-grid) y un sistema de conexión en red en autoconsumo (On-grid) para el uso en la vivienda urbana en Perú.*

Saorín Rodriguez, I. (2025). *Estudio de Viabilidad Técnico-Económica de la Hibridación de una Instalación Solar Fotovoltaica para Autoconsumo. Aplicación a un caso de estudio.* Universidad Politécnica de Cartagena.

Trading Economics. (s.f.). *Spain – Electricity prices: Medium size households (Eurostat data)*. Obtenido de Trading Economics: https://tradingeconomics.com/spain/electricity-prices-medium-size-households-eurostat-data.html

U.S. Department of Energy, Solar Energy Technologies Office (SETO). (s.f.). *Solar Photovoltaic Cell Basics*. Obtenido de Energy.gov (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy): https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics

Victron Energy B.V. (s.f.). *MultiPlus-II 230V 48/5000/70-50 — Ficha técnica (ES).* Victron Energy B.V.