

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de la Energía

Estudio sobre la Posibilidad de Aislar una Vivienda de la Red Eléctrica mediante el Uso de Tecnologías del Hidrógeno.

Autor: Blanca García Cano.

Tutores: Sergio Jesús Navas Herrera.

Gracia María Cabello González.

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

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Estudio sobre la Posibilidad de Aislar una Vivienda de la Red Eléctrica mediante el Uso de Tecnologías del Hidrógeno.

Autor:

Blanca García Cano

Tutores:

Sergio Jesús Navas Herrera
Profesor Sustituto Interino

Gracia María Cabello González
Profesor Sustituto Interino

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Estudio sobre la Posibilidad de Aislar una Vivienda de la Red Eléctrica mediante el Uso de Tecnologías del Hidrógeno.

Autor: Blanca García Cano

Tutores: Sergio Jesús Navas Herrera y Gracia María Cabello
González

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

*Para mamá y papá, por creer en mi cuando ni yo lo hacía.
Espero que os sintáis tan afortunados de ser mis padres como me siento yo de
ser vuestra hija.
Gracias por el apoyo incondicional y por navegar la vida conmigo siempre.
Espero algún día llegar a ser la mitad de lo maravillosos que sois vosotros.
Os quiero hasta cuando nadie me ve, y no poco.*

Agradecimientos

Este trabajo me deja un sentimiento agri dulce. Con él, concluye una de las etapas más bonitas de mi vida, llena de esfuerzo y dedicación. Si estoy donde estoy es gracias al apoyo de las personas que tengo a mi alrededor, y esto es para vosotros.

A mamá y papá, por vuestra paciencia infinita en los momentos de agobio, y por celebrar cada una de mis victorias como si fueran propias. Sin vosotros esto habría sido imposible.

A mis tutores, Sergio y Gracia porque vuestra guía, ayuda y paciencia han sido esenciales para poder completar este trabajo.

Y en especial gracias a Cracovia, por darme esta idea y hacerse hogar en tan poco tiempo. Esto no habría existido sin ella.

Blanca García Cano

Sevilla, 2024

Resumen

La gran preocupación actual por las fuentes de energía y el abastecimiento ha empujado a la sociedad a ampliar el enfoque tradicional y ha permitido encontrar nuevas formas de obtención de energía para hacer frente a todos los problemas que han surgido a lo largo de los años por el uso de combustibles fósiles.

En este camino hacia un futuro más verde, surge el hidrógeno, que ha ido ganando interés entre la población y los expertos energéticos por ser una fuente de energía limpia. No obstante, sigue en proceso de estudio y cada día se descubren nuevas características y posibles usos para ellas.

Este trabajo se centra en desarrollar la idea de tener casas aisladas de la red eléctrica convencional, en las que toda la energía se suministre a partir de energías renovables y tecnologías que involucren al hidrógeno.

Para realizarlo, se ha diseñado un prototipo de la instalación que se debería desarrollar para construir un sistema que sea capaz de abastecer las necesidades de los habitantes de una vivienda.

Los resultados de los cálculos de este estudio muestran que, mediante el uso de paneles solares monocristalinos, electrolizadores y pilas de combustible de intercambio de membrana protónica, baterías de ion-litio y un sistema de almacenamiento de hidrógeno en tanques a baja presión, es viable la creación de una instalación capaz de suministrar energía eléctrica a una vivienda aislada.

Abstract

The current major concern over energy sources and supply has pushed society to broaden the traditional approach and allowed for the discovery of new ways to obtain energy to address the various problems that have arisen over the years from the use of fossil fuels.

On this path towards a greener future, hydrogen has emerged, gaining interest among the public and energy experts as a clean energy source. However, it is still under study, with new characteristics and potential uses being discovered every day.

This work focuses on developing the idea of having houses isolated from the conventional electrical grid, where all energy is supplied through renewable energies and technologies involving hydrogen.

To achieve this, a prototype of the installation has been designed, which should be developed to build a system capable of meeting the needs of the inhabitants of a dwelling.

The results of the calculations from this study show that, through the use of monocrystalline solar panels, electrolyzers and proton exchange membrane fuel cells, lithium-ion batteries, and a hydrogen storage system in low-pressure tanks, it is feasible to create an installation capable of supplying electricity to an isolated home.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de ilustraciones	xix
1. Introducción	1
1.1 <i>Métodos de producción de hidrógeno</i>	3
1.1.1. Electrólisis del agua	4
1.1.2. Reformado de Gas Natural	4
1.1.3. Gasificación del carbón	4
1.1.4. Termólisis	5
1.1.5. Fotocatálisis	5
1.2 <i>Tipos de hidrógeno</i>	6
1.3 <i>Almacenamiento de hidrógeno.</i>	8
1.3.1. Almacenamiento a presión	8
1.3.2. Almacenamiento de hidrógeno licuado	9
1.3.3. Almacenamiento de hidrógeno por adsorción	9
1.4 <i>Pilas de Combustible</i>	11
1.5 <i>Electrolizadores</i>	12
1.6 <i>Hidrógeno verde</i>	13
1.7 <i>Implementación en una vivienda unifamiliar aislada de la red eléctrica</i>	14
2 Objetivos del proyecto	15
3 Descripción del Proceso de diseño de la instalación	17
3.1. <i>Descripción teórica de la instalación planteada para aislar una vivienda de la red eléctrica.</i>	17
3.2. <i>Descripción de las fases del proyecto</i>	18
4 Cálculos	21
4.1. <i>Introducción</i>	21
4.2. <i>Cálculo del número de Pilas de Combustible</i>	22
4.3. <i>Cálculo del volumen necesario de hidrógeno, horas de funcionamiento y número de electrolizadores.</i>	25
4.4. <i>Cálculo del número de paneles solares</i>	28
4.5. <i>Cálculo de la energía a almacenar</i>	31
4.6. <i>Cálculo del número de baterías</i>	33
4.7. <i>Cálculo de la capacidad de los tanques de almacenamiento de hidrógeno</i>	33
4.8. <i>Resumen Cálculos</i>	34

5. Selección de equipos	37
5.1. <i>Introducción</i>	37
5.2. <i>Selección del Panel Fotovoltaico</i>	37
5.3. <i>Selección de la Pila de Combustible</i>	38
5.4. <i>Selección del Electrolizador</i>	40
5.5. <i>Selección de la tecnología de las baterías</i>	41
5.6. <i>Selección del tanque almacenamiento</i>	42
5.7. <i>Conclusión selección de equipos</i>	43
6. Conclusiones	45
Referencias	47
Anexos	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Desglose de fuentes de electricidad	2
Tabla 2: Resumen de los tipos de hidrógeno	8
Tabla 3: Comparativa de Tecnologías de Almacenamiento	10
Tabla 4: Datos de Demanda de Energía	23
Tabla 5: Resultados cálculos tiempo de funcionamiento (min)	24
Tabla 6: Resultados horarios litros hidrógeno	26
Tabla 7: Comparativa Horas Sol	27
Tabla 8: Extracto de la potencia generada en las horas de sol más productivas de un día de invierno	30
Tabla 9: Resumen Global Cálculos	34
Tabla 10: Resumen Selección Equipos	43
Tabla 1A: Datos Irradiancia Invierno (Anexo 1)	51
Tabla 2A: Datos Irradiancia Verano (Anexo 2)	55
Tabla 3A: Demanda Energética Residencia (Anexo 3)	59
Tabla 4A: Evolución de la potencia generada por un panel para los datos de irradiancia de un día de invierno (Anexo 4)	60
Tabla 5A: Evolución de la potencia generada por un panel para los datos de irradiancia de un día de verano (Anexo 5)	64

ÍNDICE DE LUSTRACIONES

Ilustración 1:Fuentes Generación Electricidad	2
Ilustración 2:Modelo Prototipo de la Instalación	18
Ilustración 3:Diagrama de Flujo del Proyecto	20
Ilustración 4.Evolución de la demanda energética de la vivienda	21
Ilustración 5.Evolución del volumen de H ₂ (Ilustración de elaboración propia)	25
Ilustración 6:Evolución de la potencia generada por los paneles a lo largo del día en invierno	29
Ilustración 7: Evolución de la energía generada por un panel en un día de verano	31

1. INTRODUCCIÓN

“La innovación es coger dos cosas que ya existen y juntarlas de una nueva manera.”

Tom Freston

La crisis energética actual se presenta como un desafío de una magnitud sin precedentes, superando las dificultades de épocas anteriores debido a la implicación de una diversidad de fuentes energéticas, no solo del petróleo.

En el pasado, las crisis energéticas solían centrarse en este, pero hoy día, tanto el gas natural como otras fuentes energéticas están profundamente involucradas, complicando el panorama.

La evolución de esta crisis ha sido gradual, culminando en un escenario donde los costes de los recursos derivados del gas y el petróleo han alcanzado niveles históricamente altos. Este encarecimiento ha impulsado a muchos países de la Unión Europea a reconsiderar el uso de combustibles fósiles, en especial el carbón. Según el estudio de Ignacio García Matos [1], hasta hace unos pocos años, aproximadamente el 37% de la electricidad mundial se generaba a partir de fuentes derivadas del carbón, una cifra significativa que refleja la dependencia de este recurso.

La crisis energética actual ha puesto de relieve la urgente necesidad de una transición hacia fuentes de energía más sostenibles. La implementación de políticas y medidas concretas es crucial para alcanzar este objetivo y garantizar un futuro energético seguro y limpio. La experiencia reciente destaca la importancia de la diversificación de fuentes de energía y la inversión en tecnologías renovables como pilares fundamentales para superar los desafíos energéticos presentes y futuros.

En respuesta a esta crisis, la Unión Europea ha adoptado medidas legislativas como la Directiva 2003/87/CE [2], que establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero dentro de la Comunidad Europea que permite a los Estados miembros cumplir con sus compromisos y otros acuerdos internacionales sobre el cambio climático, ya que introduce el primer esquema multinacional de comercio de emisiones y permite a las instalaciones industriales comprar o vender derechos de emisión de CO₂, incentivando de esa forma la reducción de emisiones donde sea más eficiente y económico hacerlo. Gracias a estos esfuerzos, según el estudio de Ignacio García Matos [1], el uso de combustibles derivados del carbón se ha reducido drásticamente hasta representar solo un 1.2% del consumo energético actual.

Hoy en día, según los datos obtenidos de las publicaciones de la Unión Europea [3], los porcentajes en cuanto a generación de electricidad según sus fuentes se reflejan en la siguiente tabla: (Tabla 1).

Fuentes de Generación	Porcentaje (%)
Gas	19.6
Carbón	15.8
Petróleo	1.6
Energía Eólica	15.9
Energía Hidroeléctrica	11.3
Energía Solar	7.6

Tabla 1: Desglose de fuentes de electricidad
(Tabla de elaboración propia)

De forma que estos datos porcentuales quedarían reflejados en el siguiente gráfico:
(Ilustración 1)

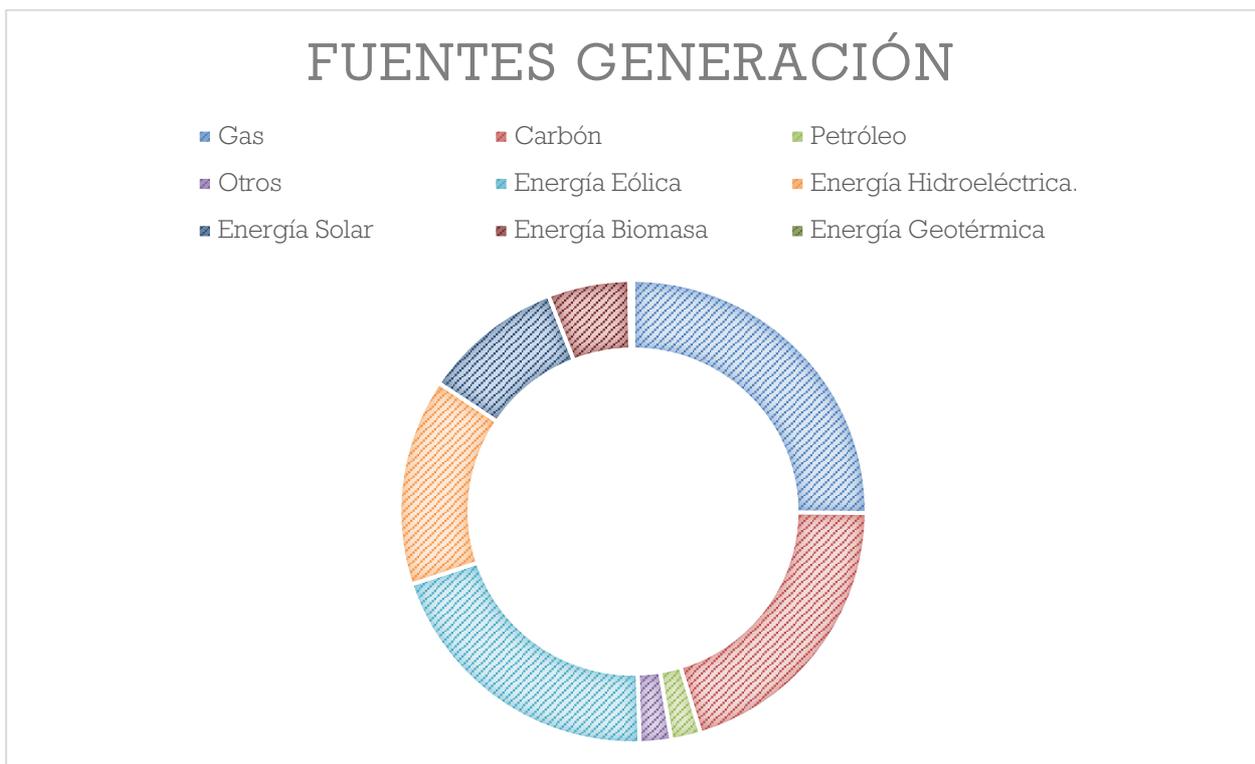


Ilustración 1: Fuentes Generación Electricidad
(Ilustración de elaboración propia)

La crisis energética en Europa se ha visto exacerbada por varios factores, siendo el más crítico la reducción drástica del suministro de gas proveniente de Rusia, con una disminución

cercana al 80%. Este suministro había sido esencial tanto para usos industriales como domésticos. Los conflictos bélicos en la región han sido el principal catalizador de esta reducción, provocando un aumento significativo en los precios mayoristas del gas y la electricidad.

Para mitigar el impacto del aumento de costes en consumidores y empresas, los gobiernos europeos han implementado diversas estrategias. Estas incluyen la imposición de límites en los precios minoristas y la creación de programas de apoyo para empresas con alto consumo energético con el objetivo de aliviar las cargas económicas inmediatas mientras se trabaja en soluciones a largo plazo.

La prolongación de la crisis ha incentivado el uso de energías renovables y ha aumentado la conciencia sobre la importancia del consumo energético eficiente, al igual que ha promovido la exploración de nuevas fuentes de energía y la expansión de sectores de energías renovables que anteriormente eran menos relevantes.

En este contexto de expansión de nuevas fuentes energéticas renovables, España se ha destacado notablemente. Según datos de REDEIA, en 2021 España fue el segundo mayor generador de energía eléctrica a partir de fuentes eólica y solar, experimentando un crecimiento del 2.6% respecto al año anterior. Esto posiciona a España entre los 15 mayores consumidores de energías limpias a nivel mundial.

En un esfuerzo por consolidar este avance, se ha establecido el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [4], que fija el año 2050 como el límite para alcanzar el 100% de generación eléctrica a partir de fuentes verdes. Las principales asociaciones del sector de energías renovables han aprovechado este impulso para acelerar la transición energética y promover recursos como la energía fotovoltaica, eólica y el hidrógeno.

De esta forma, el hidrógeno, especialmente el verde es visto por muchos expertos como una solución viable para evitar una recesión energética. En medio del auge de este sector, estudios como el publicado por Javier Brey (director de la Asociación Española del Hidrógeno), Pablo Monge, Manuel Casamayón, José Donoso y Javier Díaz [5] demuestran que se están desarrollando numerosos proyectos que prometen transformar el panorama energético y estimular el crecimiento económico y la creación de empleo en las pequeñas y medianas empresas.

1.1 Métodos de producción de hidrógeno

La producción de hidrógeno es un campo amplio con una diversidad de métodos, cada uno con características y aplicaciones particulares. Este estudio, ayudándose de la información publicada por David Solera Rico [6], se centra en los métodos más comúnmente utilizados y estudiados, proporcionando una exploración detallada de sus procesos, ventajas y limitaciones para entender mejor su potencial y desafíos en la transición hacia una economía basada en el hidrógeno.

1.1.1. Electrólisis del agua

La electrólisis del agua es un proceso central en la producción de hidrógeno, que implica la separación de las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de una corriente eléctrica. Este método es notable por su capacidad de producir hidrógeno sin emisiones directas de carbono, especialmente cuando se utiliza electricidad generada a partir de fuentes renovables.

- o Electrólisis Alcalina

La electrólisis alcalina utiliza un electrolito básico, típicamente una solución de hidróxido de potasio o sodio, y es compatible con la integración de sistemas de energías renovables como la solar o la eólica. Esta compatibilidad permite manejar la variabilidad de la producción de energía renovable, logrando eficiencias de hasta el 80% a un coste relativamente bajo. La electrólisis alcalina es una tecnología madura y bien entendida, lo que facilita su implementación a gran escala.

- o Electrolizadores PEM

Los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM) operan en un medio ácido y están protegidos por una membrana que permite el paso de protones mientras bloquea gases como el hidrógeno y el oxígeno. Esta tecnología es particularmente adecuada para la producción de hidrógeno a pequeña escala debido a su alta eficiencia y capacidad de respuesta rápida. Los electrolizadores PEM pueden ser más costosos que los alcalinos, pero su diseño compacto y mayor eficiencia en condiciones variables de carga los hacen ideales para aplicaciones descentralizadas y uso doméstico.

1.1.2. Reformado de Gas Natural

El reformado de gas natural es el método más extendido para la producción de hidrógeno, representando aproximadamente el 48% de la producción mundial. En este proceso, el metano (CH_4), principal componente del gas natural reacciona con vapor de agua a altas temperaturas (800-1000°C) [7], [8] y presiones moderadas para producir hidrógeno y dióxido de carbono (CO_2).

El gas natural es una materia prima abundante y económica, y su infraestructura de distribución está bien establecida globalmente. Sin embargo, la producción de hidrógeno a través del reformado de gas natural genera emisiones significativas de CO_2 , contribuyendo al cambio climático. Además, la dependencia de los combustibles fósiles plantea serias preocupaciones sobre la sostenibilidad a largo plazo de este método, y la necesidad de infraestructura adicional para el almacenamiento y transporte del hidrógeno añade complejidad y costos al proceso.

1.1.3. Gasificación del carbón

La gasificación del carbón convierte el carbón sólido en un gas sintético conocido como Syngas, compuesto principalmente de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2). Este proceso se logra mediante la oxidación parcial del carbón a altas temperaturas en presencia de un agente gasificante, como vapor de agua o aire.

El carbón es una fuente de energía abundante y accesible, y la infraestructura para su extracción y uso está bien desarrollada. Sin embargo, la gasificación del carbón, aunque puede ser más limpia que la quema directa de carbón todavía emite gases de efecto invernadero y otros contaminantes. El proceso también requiere grandes cantidades de agua y energía, lo que plantea desafíos de sostenibilidad y competencia con tecnologías más limpias y eficientes.

1.1.4. Termólisis

La termólisis es método de descomposición del agua mediante la aplicación de calor extremo. La termólisis directa requiere temperaturas muy altas (alrededor de 2500 °C)[9], lo que es difícil de lograr y mantener.

La termólisis ofrece una alta eficiencia energética y flexibilidad en cuanto a los materiales de alimentación. Produce hidrógeno de alta pureza como menores emisiones contaminantes en comparación con otros métodos. Sin embargo, el elevado consumo energético, los altos costes de inversión y operación, y la necesidad de gestionar los residuos del proceso son desafíos significativos que limitan su viabilidad comercial en la actualidad.

1.1.5. Fotocatálisis

La fotocatálisis es una técnica emergente para producir hidrógeno a partir de la disociación del agua utilizando la energía de la radiación solar y fotocatalizadores químicos. Esta tecnología tiene el potencial de ser una fuente de energía renovable con un bajo impacto ambiental y alta eficiencia energética.

Las aplicaciones de la fotocatálisis, tales como tratamiento de aguas residuales o aplicaciones sanitarias [10], [11], pueden ser consideradas descentralizadas, permitiendo su implementación en una amplia variedad de entornos. Sin embargo, la tecnología enfrenta a varios desafíos, como los altos costes iniciales debido a la necesidad de desarrollar e implementar equipos especializados. Además, la dependencia de la luz solar limita su eficacia en regiones con baja radiación solar o durante la noche. También enfrenta problemas relacionados con el almacenamiento y transporte del hidrógeno producido, complicando su aplicación a gran escala. A pesar de su gran potencial, la fotocatálisis sigue siendo una tecnología en desarrollo que requiere más investigación para optimizar su eficiencia y reducir las limitaciones.

En resumen, la producción de hidrógeno es un campo dinámico y en constante evolución, con una variedad de métodos que ofrecen diferentes ventajas y desafíos. La elección del método más adecuado depende de múltiples factores como la disponibilidad de recursos, costes, eficiencia, impacto ambiental y sostenibilidad a largo plazo. La investigación y el desarrollo continuos son esenciales para mejorar estos métodos y hacer del hidrogeno una fuente de energía viable y limpia. A medida que avanzamos hacia una economía más sostenible, la optimización y diversificación de las tecnologías de producción de hidrógeno serán cruciales para enfrentar los desafíos energéticos globales y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

1.2. Tipos de hidrógeno

En la actualidad, el mercado ofrece diversos tipos de hidrógeno que se clasifican en tres grupos generales según sus métodos de producción y su impacto ambiental (Tabla 2). Cada tipo de hidrógeno, tal y como reitera la publicación de Genia Global Energy ([12]), tiene características específicas y aplicaciones potenciales que, en conjunto, contribuyen a la diversificación y optimización del uso de esta fuente de energía.

o Hidrógeno no renovable

Este grupo incluye tipos de hidrógeno cuya producción implica la utilización de combustibles fósiles y que, en consecuencia, generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero. Este grupo incluye los siguientes tipos de hidrógeno:

- *Hidrógeno gris*

Se produce a partir del reformado de gas natural, principalmente metano (CH_4). Durante este proceso, se emiten cantidades considerables de dióxido de carbono (CO_2), lo que contribuye al cambio climático. A pesar de su bajo coste de producción, el impacto ambiental de este tipo de hidrógeno es considerablemente alto.

- *Hidrógeno marrón y negro*

El hidrógeno marrón y el negro se obtienen a partir de la gasificación del carbón y el petróleo, respectivamente. Estos métodos liberan grandes cantidades de CO_2 y otros contaminantes, haciéndolos altamente perjudiciales para el medio ambiente. Aunque el carbón y el petróleo son recursos abundantes, la sostenibilidad y el impacto ambiental negativo de estos procesos limitan su viabilidad a largo plazo.

o Hidrógeno experimental

Este grupo incluye tipos de hidrógeno que se encuentran en etapas de investigación y desarrollo, con el objetivo de optimizar su producción y reducir sus impactos ambientales. En este grupo encontramos estos tres tipos:

- *Hidrógeno naranja*

Se obtiene aprovechando emisiones y residuos de diferentes sectores con el objetivo de evitar que su destino final tenga impactos medioambientales negativos, como bien podrían ser la incineración o su depósito en vertedero. Este tipo de hidrógeno emite cierta cantidad de CO_2 , pero es posteriormente aprovechada para generar más.

- *Hidrógeno ámbar*

El hidrógeno ámbar tiene un proceso de generación parecido al del hidrógeno naranja, pero en este caso, además de aprovechar las emisiones de CO_2 para el propio proceso de producción, se captura y se almacena para que el excedente nunca llegue a la atmósfera.

- *Hidrógeno blanco*

El hidrógeno blanco es el que se encuentra directamente en forma gaseosa en depósitos subterráneos. Es un recurso poco habitual y desarrollado, no existiendo aún técnicas lo suficientemente eficientes y viables económicamente para extraerlo de forma segura.

- Hidrógeno de Cero Emisiones

Este grupo incluye tipos de hidrógeno producidos mediante métodos que generan pocas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero. Estos métodos son esenciales para la transición hacia una economía de energía limpia. Los principales tipos son:

- *Hidrógeno azul*

Se produce a partir del reformado de gas natural, pero incluye la captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de CO₂. Este proceso permite utilizar los recursos fósiles existentes mientras se mitiga su impacto ambiental, posicionándose como una opción intermedia en la transición hacia fuentes de energía más limpias.

- *Hidrógeno rosa*

Se obtiene a partir de la electrolisis del agua, utilizando electricidad generada a partir de energía nuclear. Este método es eficaz para producir hidrógeno con cero emisiones de carbono, siempre y cuando la energía nuclear sea gestionada de manera segura y sostenible.

- *Hidrógeno verde*

Se obtiene a través de la electrolisis del agua utilizando electricidad generada exclusivamente a partir de fuentes renovables, como la solar y la eólica. Este tipo de hidrógeno es considerado el más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, ya que no produce emisiones de CO₂ durante su producción. Sin embargo, su coste de producción es actualmente más alto en comparación con otros métodos, aunque se espera que disminuya con el avance tecnológico y la expansión de las energías renovables.

En resumen (Tabla 2), la diversificación de los tipos de hidrógeno refleja los esfuerzos globales por equilibrar la necesidad de energía con la urgencia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Cada tipo de hidrógeno tiene un papel específico en la transición hacia un sistema energético más sostenible. La investigación y el desarrollo continuos son fundamentales para mejorar la eficiencia y la viabilidad económica de los métodos de producción de hidrógeno, especialmente aquellos que prometen cero emisiones. En última instancia, el éxito en la adopción de hidrógeno como una fuente de energía clave dependerá de la colaboración entre gobiernos, industrias y la comunidad científica para superar los desafíos tecnológicos y económicos que aún persisten.

TIPO	MÉTODO PRODUCCIÓN
GRIS	Se obtiene a partir de gas natural.
NEGRO	Se obtiene a partir de la gasificación del carbón.
MARRÓN	Se produce a través del lignito.
NARANJA	Se aprovechan las emisiones o residuos de otros sectores para evitar un destino final con impactos medioambientalmente negativos.
ÁMBAR	Aprovecha el CO ₂ , pero también lo captura y almacena para que no llegue a la atmósfera.
AZUL	Procedente del reformado de gas natural, pero durante el proceso se captura CO ₂ para evitar su emisión a la atmósfera.
BLANCO	Se encuentra directamente en estado gaseoso en depósitos bajo tierra.
ROSA	Procede de la electrolisis llevada a cabo a partir de energía nuclear.
VERDE	Se obtiene a partir de energías renovables y se usan los excedentes energéticos para la electrólisis del agua

Tabla 2: Resumen de los tipos de hidrógeno
(Tabla de elaboración propia)

1.3. Almacenamiento de hidrógeno.

El almacenamiento del hidrógeno es una preocupación fundamental dentro del sector energético. Dada la relevancia de esta problemática, numerosos investigadores han dedicado sus esfuerzos al estudio y desarrollo de diversas tecnologías de almacenamiento. Para este trabajo, se abordarán las cuatro tecnologías consideradas principales en el sector con el fin de proporcionar una comprensión clara y estructurada de los avances en este campo.

1.3.1. Almacenamiento a presión

El almacenamiento de hidrógeno a altas presiones implica el uso de contenedores metálicos, principalmente de acero, diseñados para soportar presiones significativamente superiores a las condiciones atmosféricas normales. Este método se basa en la compresión del hidrógeno

hasta alcanzar presiones típicamente entre 350-700 bares [13], [14]. Sin embargo, en función de las exigencias específicas de cada aplicación, se pueden optar por materiales alternativos que ofrezcan ventajas adicionales, como la reducción del peso o la capacidad de soportar presiones aún mayores.

Un ejemplo de innovación en este campo es la utilización de compuestos como la fibra de carbono, con un revestimiento interno de aluminio. Estos materiales permiten una mejora sustancial en la capacidad de almacenamiento de hidrógeno, ofreciendo una combinación de resistencia y ligereza que resulta especialmente útil en aplicaciones donde el peso es un factor crítico, como en la automoción o en la aeronáutica.

1.3.2. Almacenamiento de hidrógeno licuado

El almacenamiento de hidrógeno en estado líquido es una estrategia en la gestión de este recurso, utilizando un enfoque criogénico. En este proceso, las temperaturas se reducen drásticamente hasta alcanzar aproximadamente los -253°C [15], lo que permite la transición del hidrógeno a su estado líquido para su almacenamiento en tanques especialmente diseñados para condiciones criogénicas.

No obstante, cabe destacar que este método conlleva desafíos, especialmente en relación con las pérdidas generadas durante el proceso de almacenamiento debido a la evaporación, fenómeno conocido como "Boil Off". Hasta la fecha, no existe un método efectivo para mitigar estas pérdidas, lo que limita la viabilidad económica de este enfoque. Por consiguiente, el almacenamiento de hidrógeno en estado líquido se utiliza preferentemente en situaciones donde es imprescindible disponer del hidrógeno en forma líquida a pesar de las pérdidas asociadas.

1.3.3. Almacenamiento de hidrógeno por adsorción

El almacenamiento de hidrógeno por absorción se basa en la utilización de hidruros metálicos, que tienen la capacidad de formar compuestos con el hidrógeno a través de reacciones químicas, generando estequiometrías que contienen una cantidad específica de hidrógeno [16]. Este método se distingue por su notable capacidad de almacenamiento por unidad de volumen, lo que convierte en una alternativa destacada en comparación con otros enfoques de almacenamiento.

Una de las ventajas más significativas de este método radica en su operación a presiones normales, lo que minimiza las pérdidas y asegura la integridad y pureza del hidrógeno almacenado. Además, el hidrógeno absorbido se libera mediante la aplicación de calor, lo que implica que permanece unido a los materiales absorbentes incluso en caso de daño en el tanque de almacenamiento.

Estas características hacen que el almacenamiento de hidrógeno por absorción sea particularmente adecuado para aplicaciones donde se requiere alta capacidad de almacenamiento en un espacio limitado y donde la integridad del sistema es crucial, destacando su uso predominante en aplicaciones submarinas.

Dentro de esta tecnología, destaca el almacenamiento en hidruros metálicos, que está demostrando tener un potencial significativo, pero se encuentra en etapas de investigación y desarrollo, y aun no se han establecido vías claras para gestionar los costos necesarios para

su implementación a gran escala. Se están estudiando materiales como las estructuras metal-orgánicas (MOFs), que permitirían diseñar almacenamientos con diferentes tamaños y formas de poro [17].

Este aspecto representa un desafío importante que requiere un enfoque estratégico y una mayor inversión en investigación y desarrollo para superar las barreras técnicas y económicas asociadas con la adopción generalizada de esta tecnología de almacenamiento de hidrógeno.

En resumen, cada tecnología de almacenamiento de hidrógeno presenta características únicas que la hacen adecuada para diferentes aplicaciones. La elección del método más apropiado depende de factores como la densidad de energía requerida, seguridad, costes, flexibilidad y escalabilidad. La investigación y desarrollo continuos en estos métodos son cruciales para superar las limitaciones actuales y mejorar la eficiencia y viabilidad económica del almacenamiento de hidrógeno, apoyando así la transición hacia una energía más limpia y sostenible.

La siguiente tabla, (Tabla 3), presenta una comparativa de diferentes características de las tecnologías de almacenamiento que se han discutido a lo largo de este trabajo, con el fin de obtener una perspectiva clara acerca de las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Eficiencia (%)	Coste	Capacidad Almacenamiento
Almacenamiento Presurizado	Temperatura Ambiente	Alta (350-700 bar)	90-95	Bajo	11.3% de peso en hidrógeno
Almacenamiento Hidrogeno Licuado	Muy bajas. (-253°C)	-	70-80	Alto	70g de hidrógeno por cada litro de hidrógeno líquido
Almacenamiento en Materiales Porosos	Temperatura Ambiente	10-100 bares	70-90	Alto	3.4% de peso en hidrógeno

Tabla 3: Comparativa de Tecnologías de Almacenamiento
(Tabla de elaboración propia)

1.4. Pilas de Combustible

Las pilas de combustible se clasifican principalmente según el tipo de electrolito que utilizan, lo que determina sus características, aplicaciones y ventajas [18]. A continuación, se describen las tres tecnologías principales del sector actualmente:

- Pilas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC)

Son las más comunes y versátiles en el mercado actual. Utilizan una membrana de polímero sólido como electrolito, lo que les permite ser relativamente compactas y adecuadas para una variedad de aplicaciones [19] [20]. Funcionan a bajas temperaturas, lo que facilita su uso en vehículos eléctricos, aplicaciones comerciales, y como es el caso de este estudio, generadores de energía residenciales y comerciales. Entre sus ventajas se encuentran la alta densidad de potencia y la rápida respuesta al cambio de carga. Sin embargo, presentan sensibilidad a la contaminación del electrolito y una necesidad de catalizadores de alto precio.

- Pilas de Combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC)

Este tipo de pila utiliza una mezcla de carbonatos alcalinos fundidos como electrolito y opera a temperaturas muy altas [21]. Son conocidas por su alta eficiencia, especialmente en aplicaciones a gran escala como plantas de energía estacionarias y sistemas de cogeneración de calor y electricidad. Las MCFC pueden alcanzar eficiencias moderadamente altas y pueden utilizar una gran variedad de combustibles, incluidos el gas natural y el biogás. Sin embargo, tienen desventajas significativas, como el alto coste inicial, la delicadeza del sistema y el prolongado tiempo de arranque.

- Pilas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)

Esta tecnología utiliza un electrolito de cerámica sólida, generalmente óxido de zirconio estabilizado con itrio, y operan a temperaturas extremadamente altas [22]. Son conocidas por su durabilidad y eficiencia, lo que las hace ideales para aplicaciones industriales. Las SOFC ofrecen alta eficiencia energética y permiten el uso de una amplia gama de combustibles, además de tener una vida útil prolongada. No obstante, sus desventajas incluyen los costes elevados, la lentitud en el arranque y los desafíos en el manejo térmico.

En resumen, cada tipo de pila de combustible presenta características únicas que la hacen más adecuada para diferentes aplicaciones, se resumen las siguientes a continuación:

- Las PEMFC son ideales para aplicaciones móviles y portátiles por su compactidad y rapidez de respuesta.
- Las MCFC y SOFC, pese a ser más costosas y complejas, ofrecen alta eficiencia y durabilidad para aplicaciones a gran escala.

1.5. Electrolizadores

Los electrolizadores son dispositivos que utilizan energía eléctrica para separar el agua (H_2O) en sus componentes, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). Existen distintos tipos de electrolizadores disponibles o en fase de desarrollo, cada uno con sus características, en este estudio vamos a estudiar las tres tecnologías predominantes en el mercado actual [23].

- o Electrolizadores Alcalinos

Los electrolizadores alcalinos representan una tecnología más antigua y madura en el campo de la electrolisis. Utilizan una solución alcalina como electrolito y operan a temperaturas relativamente bajas. Este tipo de electrolizador se caracteriza por su robustez y economía, siendo esta una opción confiable y duradera. Sin embargo, su eficiencia es baja en comparación con otras tecnologías más modernas.

- o Electrolizadores de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

Este tipo de electrolizador presenta una tecnología más reciente y en rápido desarrollo. Utilizan una membrana de polímero sólido como electrolito y operan a temperaturas algo más bajas que los electrolizadores alcalinos. Estos electrolizadores son compactos y ligeros, y se distinguen por su alta eficiencia. No obstante, presentan ciertas desventajas, como el alto coste de fabricación y la sensibilidad a la calidad del agua utilizada en el proceso. Esta tecnología es ideal para aplicaciones donde la eficiencia y el tamaño compacto son cruciales.

- o Electrolizadores de Óxido Sólido (SOEC)

Esta tecnología está en fase de desarrollo y representa la tecnología más avanzada en el campo de la electrolisis. Utilizan un electrolito de cerámica sólida operando a altas temperaturas. Este tipo de electrolizador ofrece la mayor eficiencia de todos los que se han presentado y se caracteriza por su durabilidad y resistencia, pero son costosos y presentan complicaciones de fabricación y operación, por lo que se limita su adopción para aplicaciones a gran escala. A pesar de estos desafíos, los SOEC son prometedores y se espera que su desarrollo continúe mejorando su futura viabilidad comercial.

Para resumir, es importante saber que cada tipo de electrolizador tiene características únicas que lo hacen adecuado para diferentes aplicaciones, por lo que es esencial conocerlas para poder escoger el que más se adapta, como es el caso de este estudio.

1.6. Hidrógeno verde

El hidrógeno verde, obtenido a partir del uso de energías renovables, se presenta como una solución innovadora y prometedora en el panorama energético actual. Su obtención a partir de fuentes renovables, como la energía solar o eólica, no solo lo convierte en un vector energético limpio, sino que también lo posiciona como una materia prima versátil y sostenible. Este tipo de hidrógeno tiene el potencial necesario para reemplazar a los combustibles fósiles en sectores y aplicaciones que hasta hace poco se consideraban difíciles de descarbonizar. Además, su capacidad como sistema de almacenamiento de energía es significativo, ofreciendo una alternativa viable en la transición hacia una economía baja en carbono.

El proceso de obtención de hidrógeno verde implica la electrolisis del agua utilizando energías renovables. Este método descompone la molecular de agua en hidrógeno y oxígeno mediante el uso de electrodos. Una vez producido, se almacena en tanques específicos que sean adecuados a las necesidades y aplicaciones particulares, y se utiliza en pilas de combustible para generar energía eléctrica. La capacidad de transporte y almacenamiento simplificado del hidrógeno representa una ventaja adicional en comparación a otras fuentes de energía.

A pesar de sus numerosas ventajas, este tipo de hidrógeno no se considera aun como una parte indispensable del panorama energético, en gran medida debido a las dificultades en investigación y desarrollo.

La producción de hidrógeno verde es generalmente más costosa que la de otros tipos, sobre todo aquellos generados a partir de combustibles fósiles. Adithya Bhashyam, reconocido analista de hidrógeno de BloombergNEF, explica lo siguiente en el artículo publicado por Javier López de Benito [24]:

“Cuando se trata de producir hidrógeno verde, hoy en día, los números están en nuestra contra. El hidrógeno gris, que proviene del gas natural, tiene un coste de producción de entre \$ 0.98 y \$ 2.93 por kilogramo. El hidrógeno azul, o hidrógeno producido con combustibles fósiles, pero sujeto a captura de carbono, cuesta entre \$ 1.8 y \$ 4.7 por kilo. Y el H₂ verde, que se produce con energías renovables, cuesta la friolera de \$ 4.5- \$ 12 por kilo. En todos los mercados que hemos encuestado, el hidrógeno verde es más caro que su contraparte gris”

Sin embargo, la disminución de los costes de las energías renovables, impulsada por recientes avances en el sector energético, a la vez que la constante investigación y mejora de las tecnologías usadas para su obtención [25], permiten que el hidrógeno verde sea cada vez más competitivo en el mercado. Otro desafío significativo es la necesidad de grandes inversiones para su implementación, ya que se requieren infraestructuras que sean capaces de soportar la producción y el almacenamiento, además de financiar la investigación necesaria para su continuo desarrollo.

A pesar de estas barreras, el hidrógeno verde presenta una ventaja crucial al poder sustituir a los combustibles fósiles en la mayoría de los sectores dependiente de ellos, contribuyendo así a los objetivos establecidos en el Acuerdo de París [26].

La Unión Europea se centra en promover iniciativas en este sector para crear una red de transporte e instalar hidrogeneras para el transporte de hidrógeno por carretera. La Agencia Internacional de Energías Renovables prevé que los costes de las instalaciones de hidrógeno disminuirán entre un 40 y 80% a largo plazo, lo que hará que el hidrógeno verde sea comercialmente rentable a partir de 2030, lo cual apunta a un futuro verde, prometedor y

sostenible en el ámbito energético.

En resumen, el hidrógeno verde emerge como una solución viable y sostenible en el camino hacia una transición energética limpia, con el suficiente potencial para transformar sectores clave y contribuir significativamente a la reducción de emisiones de carbono a nivel global. Todas esas características lo hacen destacar como una opción perfecta para este estudio, subrayando su relevancia y potencial en el contexto energético actual y futuro.

1.7. Implementación en una vivienda unifamiliar aislada de la red eléctrica

Desde esta perspectiva de falta de investigación y desarrollo en el uso doméstico del hidrógeno, sobre todo del hidrógeno verde, se me suscita la curiosidad de estudiar la posibilidad de trabajar sobre la viabilidad de aislar una vivienda de la red eléctrica y valorar la posibilidad de su consecución.

Esta implementación de un sistema energético basado en hidrógeno y energías renovables en una vivienda unifamiliar aislada de la red eléctrica representa un enfoque innovador y sostenible para la generación de energía limpia y autónoma. En este contexto, se propone el uso de módulos fotovoltaicos como fuente primaria de generación de electricidad. Estos paneles solares capturan la energía solar y la convierten en electricidad, que luego alimentará el proceso de producción de hidrógeno.

El hidrógeno verde se producirá mediante la electrólisis del agua, utilizando la electricidad generada por los módulos fotovoltaicos. Este proceso garantiza la obtención de un combustible limpio y sostenible, sin emisiones de carbono.

Para el almacenamiento del hidrógeno producido, se empleará el método de almacenamiento en depósitos a baja presión. Esta elección se fundamenta en las características de seguridad y eficiencia que ofrece este método. Almacenar el hidrógeno en este tipo de tanques minimiza el riesgo de explosión o incendio, lo que resulta crucial para la seguridad de la instalación y sus ocupantes.

Este enfoque de producción y almacenamiento de energía ofrece una solución integral y autónoma para satisfacer las necesidades eléctricas de la vivienda unifamiliar. Al aprovechar recursos renovables como el sol y el hidrógeno verde, se promueve la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y se contribuye a la mitigación del cambio climático.

En resumen, la implementación de un sistema energético basado en hidrógeno y energías renovables en una vivienda unifamiliar aislada de la red eléctrica ofrece una alternativa eficiente, segura y sostenible para el suministro de energía eléctrica.

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

En el contexto energético actual, la búsqueda de nuevas formas de energía ha adquirido una gran importancia. Esta búsqueda se impulsa por la nueva necesidad de reducir la dependencia a los combustibles fósiles, que no solo han demostrado ser finitos, sino que también se han convertido en una de las principales causas del cambio climático y de la contaminación ambiental. La curiosidad por nuevas formas de energía no es solo una cuestión teórica o científica, sino también, por tanto, un reflejo de una conciencia colectiva emergente: Cada vez más personas están interesadas en tratar de comprender como funcionan las energías renovables y los beneficios que aportan, al igual que sus formas de integración en la vida cotidiana. Este interés se ha fomentado por la gran difusión de información que han compartido diferentes grupos del sector energético a través de redes sociales, medios de comunicación y campañas educativas, centrándose todos ellos en destacar la importancia de un futuro energético verde.

Este contexto de curiosidad e implicación social ha dado lugar al desarrollo y expansión de tecnologías como la energía solar, hidráulica, eólica, etc. Las innovaciones en almacenamiento de energía, como las baterías de ion-litio, que se verán más adelante, y las recientes investigaciones centradas en convertir el hidrógeno verde en un vector energético, ofrecen la posibilidad de crear sistemas energéticos descentralizados, como es el caso de este estudio.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es construir una vivienda aislada de la red eléctrica y autónoma energéticamente mediante el uso de tecnologías basadas en hidrógeno.

Este objetivo abarca no solo la creación de un sistema que permita a la vivienda operar sin necesidad de conexión a las redes de suministro eléctrico tradicionales, sino también la implementación de una solución sostenible en términos de energía.

Para alcanzar este objetivo, se deben cumplir una serie de objetivos particulares que abordan diversas facetas del proyecto:

- Objetivo particular 1: Investigar las diferentes tecnologías para la generación de hidrógeno y adecuarlas al proyecto.
- Objetivo particular 2: Diseñar un prototipo de instalación adecuado para la generación de hidrógeno.

Se evaluará la implementación de un sistema integrado que permita una transición entre diferentes fuentes y formas de energía, pero asegurando el suministro de forma constante y fiable.

Este trabajo tiene, pues, como meta, construir una vivienda autónoma y proporcionar un marco detallado y viable para la construcción de ésta, ayudándose de la reciente curiosidad y compromiso de la sociedad, que impulsan la transformación energética aventurando beneficios ambientales, sociales y económicos a largo plazo.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

El objetivo de este punto es proporcionar una comprensión clara y concisa sobre el proceso llevado a cabo en el proceso de diseño de la instalación y así poder identificar todas las áreas de la instalación.

3.1. Descripción teórica de la instalación planteada para aislar una vivienda de la red eléctrica.

La finalidad de este proyecto es crear una instalación capaz de utilizar energías renovables, con un enfoque en el hidrógeno, para suministrar energía a una vivienda independiente. Se ha seguido un procedimiento basado en los datos de demanda proporcionados, con el objetivo de crear una instalación que sea capaz de abastecerla aprovechando al máximo los diferentes recursos y tecnologías disponibles. Entre estos recursos destacan el hidrógeno, usado para producir la energía eléctrica que se le suministrará a la vivienda, y la energía solar, que se usará tanto para proporcionar energía a los electrolizadores como para asegurar que el sistema es capaz de cubrir la demanda energética necesaria, de forma que sean capaces de generar el hidrógeno necesario para la vivienda.

El proceso de generación y suministro de energía mediante el uso de tecnologías del hidrogeno comienza con la captación de energía solar mediante el uso de paneles solares. Los paneles fotovoltaicos desempeñan un papel crucial al convertir la radiación solar en electricidad (Ilustración 2).

La cantidad de energía generada por estos paneles depende de varios factores, entre los que se incluyen la intensidad de la radiación solar, la superficie del panel fotovoltaico y su eficiencia.

Una vez se ha generado la energía eléctrica necesaria para que los electrolizadores se pongan en marcha, el exceso de energía que se genera se almacena para poder suministrar energía a los mismos en periodos en los que no haya luz solar.

El hidrogeno producido en el electrolizador será almacenado en tanques a bajas presiones para garantizar el suministro durante aquellas horas en las que no haya sol y posteriormente introducido en una pila de combustible para finalmente suministrar electricidad a la vivienda.

Para garantizar un suministro ininterrumpido de energía durante las 24 horas del día en una instalación real, el sistema incluye baterías, que almacenan el exceso de energía generada durante el día, al igual que la que se genere una vez se ha producido el hidrógeno necesario para el suministro diario, y permiten su uso durante la noche o en días nublados cuando la radiación solar es insuficiente para satisfacer la demanda energética.

Como se ha dicho, ese sería el procedimiento a seguir en una instalación real. En este caso, el procedimiento que se ha seguido para el dimensionamiento ha sido en base al momento de máxima demanda que se debe abastecer, que ha sido el expuesto en el siguiente punto.

El diseño del sistema está orientado a proporcionar una fuente de energía continua y confiable. Este enfoque no solo maximiza el uso de recursos renovables, sino que también minimiza la dependencia de las condiciones climáticas, asegurando un suministro constante de energía.

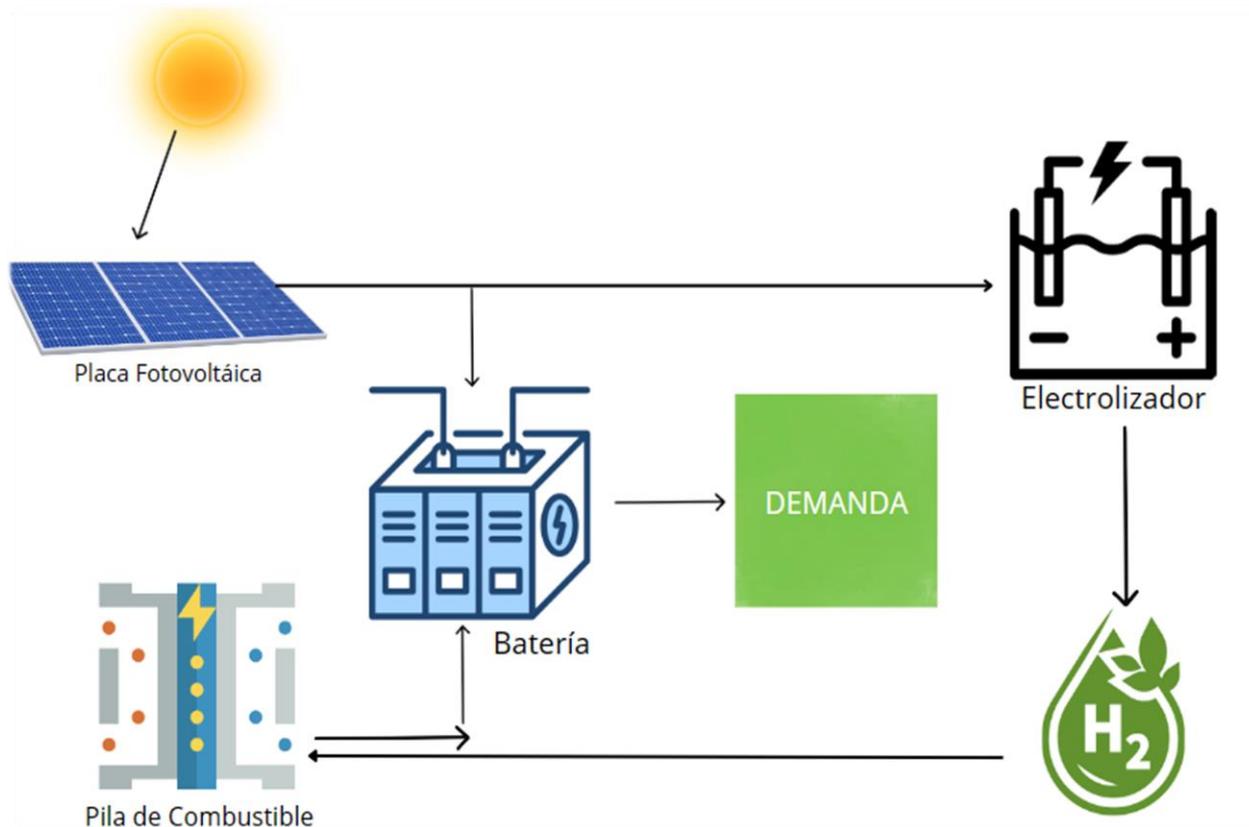


Ilustración 2: Modelo Prototipo de la Instalación
(Ilustración de elaboración propia)

3.2. Descripción de las fases del proyecto

Para diseñar la instalación final, es necesario definir una serie de pasos que garanticen la correcta realización del proyecto.

El proceso comienza con la determinación de construir una instalación capaz de suministrar electricidad a una vivienda aislada de la red eléctrica mediante el uso de tecnologías del hidrógeno, pero para poder lograr este objetivo se han seguido los siguientes pasos (Ilustración 3):

- o Estudio de tecnologías

Se ha realizado un análisis exhaustivo de las tecnologías de hidrógeno disponibles en el mercado hoy en día. Este estudio tiene como objetivo comprender la situación global en el avance de estas tecnologías y conocerlas en profundidad para su posterior aplicación al proyecto.

El análisis incluye la revisión de equipos, sistemas y procesos de fabricación y almacenamiento de hidrógeno en el contexto de viviendas.

- Diseño de la instalación

Basándose en el estudio previo, se procede a diseñar una instalación que satisfaga las necesidades y características de la vivienda. En esta fase se consideran aspectos clave como:

- ❖ Ubicación: se considera una ubicación relativamente aislada, ya que la instalación requiere un espacio que no suele estar disponible en entornos urbanos densos.
- ❖ Características de la vivienda: se evalúan las condiciones ambientales y otros factores relevantes como el espacio disponible.

- Selección de las tecnologías

Se eligen las tecnologías y equipos más adecuados a las características previamente definidas, utilizando el análisis inicial de mercado como referencia. En esta etapa, se incluye la realización de los cálculos necesarios para dimensionar la instalación, tales como:

- ❖ Cálculo del número de paneles solares
- ❖ Cálculo del número de electrolizadores
- ❖ Cálculo del número de pilas de combustible
- ❖ Cálculo del número de baterías para almacenar energía
- ❖ Cálculo del número de tanques de almacenamiento de hidrógeno necesarios

- Búsqueda de equipos

Una vez se han realizado todos los cálculos pertinentes, se procede a la búsqueda de equipos que cumplan con los requerimientos de la instalación. Se analiza en profundidad el tipo de tecnología escogida para cada equipo con el fin de comprender completamente su operación y verificar que lo seleccionado teóricamente satisface las necesidades reales de la instalación.

- Análisis de datos

Todo el diseño se basa en los datos de demanda e irradiancia proporcionados, que son fundamentales para crear una imagen completa del sistema. El objetivo es lograr una instalación capaz de cubrir, a nivel teórico, las necesidades energéticas de los habitantes en condiciones normales.

Para este estudio específico, se ha contextualizado la información teniendo en cuenta las necesidades particulares de la vivienda propuesta, situada en Sevilla, en el sur de España.

Esta ubicación experimenta condiciones climatológicas variables a lo largo del año, con inviernos suaves (con temperaturas alrededor de 15°C) y veranos extremadamente cálidos (con temperaturas superiores a 40°C).

Estas condiciones requieren una instalación capaz de adaptarse a las fluctuaciones de carga debido a los cambios climáticos y que sea capaz de operar eficientemente. Por lo tanto, la

vivienda debe ser una estructura plurifamiliar aislada, como un chalé, con suficiente terreno circundante para albergar todos los equipos necesarios de manera segura.

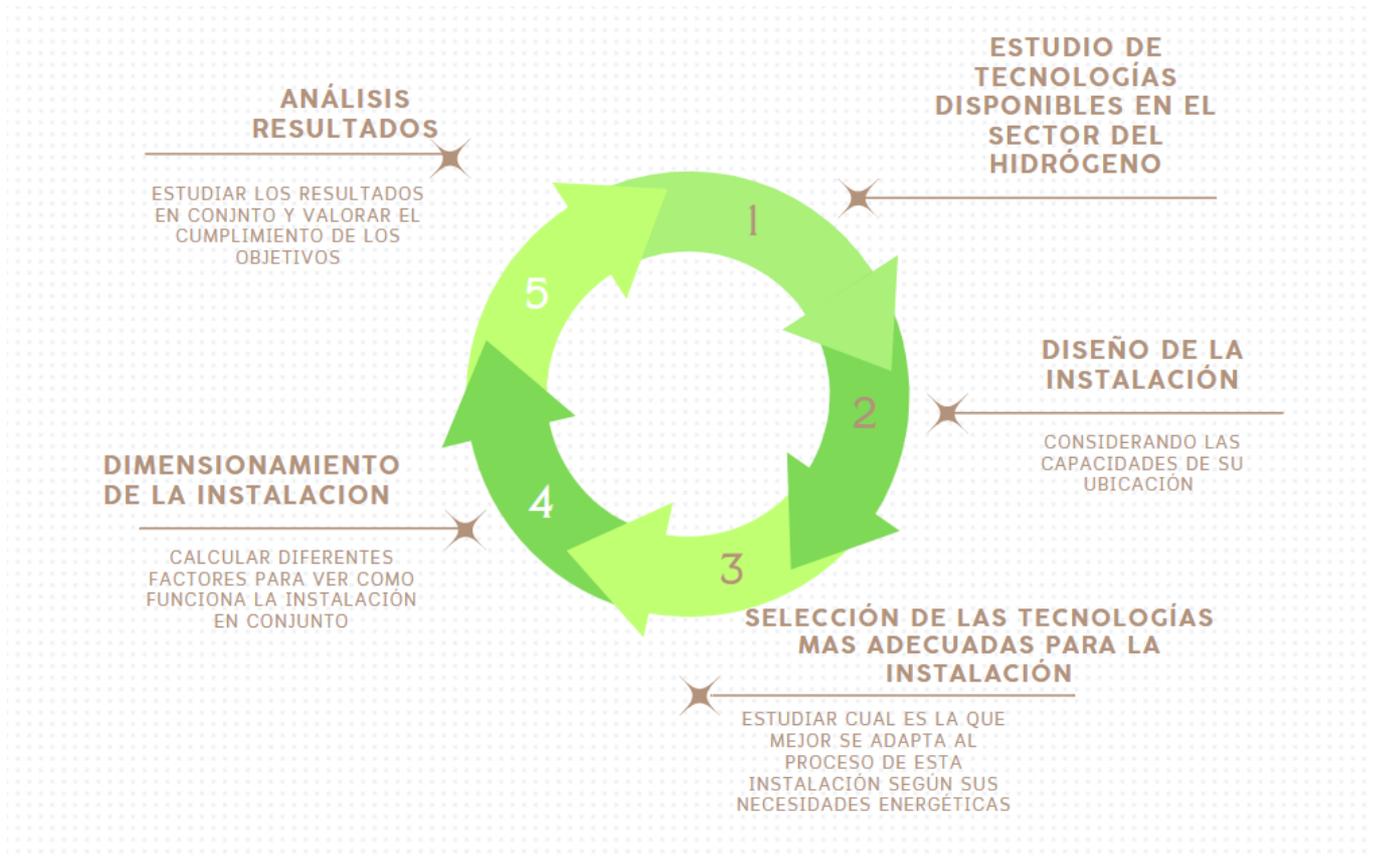


Ilustración 3:Diagrama de Flujo del Proyecto
(Ilustración de elaboración propia)

4 CÁLCULOS

4.1. Introducción

Para llevar a cabo una selección adecuada de los equipos necesarios para la instalación, es esencial realizar previamente una serie de cálculos detallados que permitan determinar con precisión las necesidades específicas de la instalación en función de la demanda energética a lo largo del día (Ilustración 4).

Estos cálculos son fundamentales para identificar el número de equipos que se requieren para satisfacer de manera eficiente la demanda proyectada.



Ilustración 4. Evolución de la demanda energética de la vivienda (Ilustración de elaboración propia)

En primer lugar, es crucial tener una comprensión clara de los datos de demanda, los cuales han sido facilitados por el grupo de investigación INGEPER de la Universidad Pública de Navarra y que pueden ser consultados de manera más detallada en la sección de anexos de este documento (Anexo 3).

A partir de estos datos, se han llevado a cabo los cálculos necesarios para dimensionar correctamente la instalación y asegurar que los equipos seleccionados sean capaces de cumplir con los requisitos operativos establecidos.

El análisis detallado de la demanda implica también tener en cuenta diversos factores como la capacidad de los equipos, el rendimiento energético o la durabilidad. Estos dos últimos

factores, siendo algo más secundario para este escenario, se han obtenido a través de la investigación teórica previa, en la que se han expuesto todas las características de este tipo de sistemas, con el único propósito de obtener una idea global de los mismos.

Este apartado se estructurará según los diferentes equipos, para presentar la información de manera más clara y organizada. Los pasos que se seguirán son, a gran escala, los siguientes:

- ❖ Cálculo del número de pilas de combustible necesarias para abastecer la máxima demanda de potencia.
- ❖ Cálculo del hidrógeno que hay que suministrar diariamente a esas pilas para que generen a máxima capacidad.
- ❖ Calcular la potencia que se debe proporcionar a los electrolizadores, al igual que el número de electrolizadores, y según eso calcular cuantas placas serían necesarias.

En todo momento se debe de tener en cuenta el almacenamiento de energía y de hidrógeno, por lo que una vez se dimensione la instalación se comenzará a diseñar el sistema de almacenamiento.

4.2. Cálculo del número de Pilas de Combustible

Para calcular el número de pilas de combustible que se necesitan para cubrir la máxima demanda de potencia, es necesario analizar los datos de demanda que se han cedido desde el grupo de investigación INGEPER de la Universidad Pública de Navarra. El pico de demanda máxima extraída de estos datos es de 2629.4 W.

- o Selección características técnicas de la pila

En este estudio se ha optado por buscar una pila de combustible que sea capaz de producir unos 1200 W, ya que se dispone del modelo validado para el cálculo de su consumo [27].

- o Cálculo del número de pilas de combustible en base a la máxima demanda

El cálculo de las pilas de combustible que son necesarias quedaría de la siguiente forma:

$$\text{Número de Pilas de Combustible} = \frac{\text{Demanda máxima}}{\text{Potencia 1 Pila}} = \frac{2629.4}{1200} = 2.19 = 3 \text{ pilas}$$

- o Cálculo de la energía generada por una pila de combustible

Este paso es indispensable para posteriormente poder trabajar con esta energía para calcular el caudal de hidrógeno diario que se necesitará proporcionar a las pilas de combustible.

En el punto 4.3, donde se han calculado los litros de hidrógeno que se le debe suministrar a las pilas para que funcionen a máxima capacidad, se obtiene un resultado que indica el volumen de hidrógeno necesario por minuto. Para poder calcular el caudal diario, es necesario saber la energía que es capaz de producir la pila en un minuto.

$$\text{Energía Pila} = \frac{\text{Potencia pila}}{60} = \frac{1200 \text{ W}}{60 \text{ min}} * 1 \text{ hora} = 20 \text{ Wh}$$

Haciendo este cálculo, se podría más adelante calcular el tiempo que debe estar funcionando el conjunto de pilas para generar la energía necesaria.

o Datos de demanda energética

Los datos de demanda energética se encuentran reflejados en la siguiente tabla (Tabla 4):

HORA DEL DIA	Wh
0:00	473.1
1:00	192.3
2:00	164.7
3:00	182.2
4:00	160.2
5:00	279.2
6:00	282.8
7:00	409.9
8:00	204.7
9:00	322.4
10:00	1231.5
11:00	212.3
12:00	154.7
13:00	293.9
14:00	296.2
15:00	430.7
16:00	390.2
17:00	435.5
18:00	446.1
19:00	728.2
20:00	560.7
21:00	571.7
22:00	755.8
23:00	296.5

Tabla 4: Datos de Demanda de Energía
(Tabla de elaboración propia)

o Cálculo del tiempo de funcionamiento del conjunto de pilas

El siguiente paso a seguir es calcular el tiempo que debería estar funcionando el conjunto de pilas de combustible para ser capaces de generar la energía necesaria, que se hace siguiendo la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de funcionamiento} = \frac{\text{Energía necesaria por hora}}{\text{Energía proporcionada a la hora por la pila}}$$

Los cálculos se han realizado en base al número de pilas de combustible, aumentando cuando el tiempo de reacción es mayor de 60 minutos, que es en base a lo que se ha calculado la energía que genera una pila, es necesario comenzar a usar otra pila de combustible, ya que el requerimiento de energía superaría a la capacidad de una única pila, y se debe garantizar la rápida respuesta del sistema.

La cantidad de tiempo que necesitaría el conjunto de pilas de combustible para generar la energía necesaria, obtenidos para las 3 pilas de combustible necesarias para la instalación quedan reflejados en la siguiente tabla (Tabla 5):

HORA DEL DIA	3 PILAS (min)
0:00	7.9
1:00	3.2
2:00	2.7
3:00	3.0
4:00	2.7
5:00	4.7
6:00	4.7
7:00	6.8
8:00	3.4
9:00	5.4
10:00	20.5
11:00	3.5
12:00	2.6
13:00	4.9
14:00	4.9
15:00	7.2
16:00	6.5
17:00	7.3
18:00	7.4
19:00	12.1
20:00	9.3
21:00	9.5
22:00	12.6
23:00	4.9

Tabla 5: Resultados cálculos tiempo de funcionamiento (min)
(Tabla de elaboración propia)

4.3. Cálculo del volumen necesario de hidrógeno, horas de funcionamiento y número de electrolizadores.

- Cálculo del volumen de hidrógeno necesario para cada pila de combustible

Para estos cálculos se utiliza la siguiente ecuación, que se ha obtenido a partir de la publicación de Sergio Jesús Navas Herrera, Gracia María Cabello González y F. Pino [27]:

$$H = 0.115 * P - 0.176$$

Donde:

- H es el consumo de hidrógeno en NI/min
- P es la potencia generada por la pila, en este caso 1200 W

Tras realizar esos cálculos, el consumo de hidrógeno necesario para la pila, que indica la cantidad de hidrógeno que hay que ir suministrándole a cada pila de la instalación para que funcione a máxima capacidad, sería de 13.624 NI/min tanto en invierno como en verano, ya que estos cálculos se realizan en base a la potencia generada de la pila.

- Cálculo del volumen de hidrógeno diario

Para ello, se calculará el volumen necesario por hora a lo largo del día usando la siguiente ecuación, y sumando todo después para obtener el volumen diario.

$$\text{Caudal horario de } H_2 = N^{\circ} \text{ pilas} * \text{Tiempo funcionamiento} * \text{NI pila}$$

Los resultados son los siguientes, que quedan reflejados en la tabla a continuación:



Ilustración 5. Evolución del volumen de H₂ (Ilustración de elaboración propia)

Hora del día	3 pilas	NL H_2 / pila	L/hora
00:00	7.9	13.6	322.6
01:00	3.2	13.6	131.2
02:00	2.7	13.6	112.3
03:00	3.0	13.6	124.2
04:00	2.7	13.6	109.2
05:00	4.7	13.6	190.4
06:00	4.7	13.6	192.9
07:00	6.8	13.6	279.5
08:00	3.4	13.6	139.6
09:00	5.4	13.6	219.9
10:00	20.5	13.6	839.9
11:00	3.5	13.6	144.8
12:00	2.6	13.6	105.5
13:00	4.9	13.6	200.5
14:00	4.9	13.6	202.0
15:00	7.2	13.6	293.7
16:00	6.5	13.6	266.1
17:00	7.3	13.6	297.0
18:00	7.4	13.6	304.3
19:00	12.1	13.6	496.6
20:00	9.3	13.6	382.4
21:00	9.5	13.6	389.9
22:00	12.6	13.6	515.4
23:00	4.9	13.6	202.2

Tabla 6: Resultados horarios litros hidrógeno
(Tabla de elaboración propia)

El resultado de hidrógeno diario es el siguiente:

$$\text{Litros } H_2 \text{ diarios} = 6462.11 \text{ L}$$

o Cálculo de las horas de funcionamiento

El siguiente paso es calcular, en base al volumen de hidrógeno necesario, las horas que debería estar funcionando un electrolizador para poder generar la cantidad de hidrógeno necesaria.

El cálculo de las horas de funcionamiento implica la consideración de varios factores clave tales como:

- La capacidad de producción de los equipos seleccionados y
- La demanda diaria de hidrógeno.

Primero, se analiza la capacidad de producción de los equipos instalados, que en este caso se ha fijado en 500 NI/h, por estar ya previamente validada en otros estudios [27], y a partir del cual se seleccionará el modelo más adelante.

A continuación, se compara esta capacidad de producción (500 NI/h) con la demanda diaria proyectada, que ha sido previamente calculada en 6462.11 L/día:

$$\text{Horas Funcionamiento} = \frac{\text{Litros necesarios diarios}}{\text{Litros generados}} = \frac{6462.11}{500} = 12.92 = 13 \text{ horas}$$

- o Estudio de la situación más desfavorable para el dimensionamiento de los electrolizadores

Para obtener el número de electrolizadores necesarios en la instalación, es importante considerar factores adicionales como los periodos de máxima irradiancia y las horas en las que el sistema va a poder funcionar a máxima capacidad (Anexos 1 y 2).

Esta planificación debe ser flexible y adaptarse a posibles cambios en la demanda o en la capacidad de producción, garantizando así que el suministro de hidrógeno sea continuo y eficiente.

Como la instalación se debe diseñar para la situación más desfavorable, se debe estudiar cuál de las dos se correspondería. Para ello, hay que estudiar las dos situaciones posibles:

ESTACIÓN	HORAS SOL TOTALES	HORAS SOL EFECTIVAS
VERANO	13	6
INVIERNO	9	4

Tabla 7: Comparativa Horas Sol
(Tabla de elaboración propia)

Tras estudiar ambas opciones (Tabla 7) se llega a la conclusión de que en este caso la situación más desfavorable se daría en invierno, ya que no se contaría con tantas horas de sol como en verano (9 frente a 13 horas), por lo que se tendría que producir lo mismo en menos horas de sol productivas.

- o Cálculo del número de electrolizadores

Se sigue la siguiente fórmula:

$$N^{\circ} \text{ electrolizadores (invierno)} = \frac{\text{Horas funcionamiento}}{\text{Horas sol}} = \frac{13}{4} = 3.23 = 4 \text{ electrolizadores}$$

En este caso, se ha redondeado a 4 electrolizadores para garantizar que la instalación sea

capaz de operar de manera eficiente y segura durante las horas productivas de sol, maximizando el uso de las horas solares disponibles y asegurando un suministro continuo de hidrógeno.

Este enfoque permite una planificación capaz de enfrentar variaciones en las condiciones de irradiancia y demanda, ya que, al sobredimensionar la instalación para las peores condiciones posibles, se garantiza un sistema capaz de responder ante los imprevistos que puedan surgir.

4.4. Cálculo del número de paneles solares

o Cálculo del consumo de potencia de los electrolizadores

La potencia que necesitarán esos electrolizadores para funcionar a máxima capacidad se calculará usando la siguiente ecuación, que se ha obtenido a partir de la publicación de Sergio Jesús Navas Herrera, Gracia María Cabello González y F. Pino [27]:

$$Q = (0.2313 * x) + 30.548$$

Donde:

- Q es la producción de hidrógeno en NI/h, que en este caso debido al modelo escogido es de 500 NI/h [27].
- X es la potencia que se le debe suministrar al electrolizador para que genere la cantidad necesaria de hidrógeno, sabiendo que debe ser como mínimo 880 W para la cantidad de hidrógeno que se quiere producir.

Se obtienen los siguientes resultados para un electrolizador y para el conjunto de los 4 necesarios para este proyecto:

$$\text{Potencia para 1 electrolizador} = 2029.62 \text{ W}$$

$$\text{Potencia total 4 electrolizadores} = 8118.5 \text{ W}$$

o Cálculo de la potencia generada por cada panel

En este caso, se ha seleccionado un panel solar con una capacidad de producción de 540 WP, tal y como se puede ver en el catálogo del fabricante [28], a partir del cual se realizarán los cálculos necesarios para determinar cuántos paneles solares se necesitan, teniendo en cuenta los datos de irradiancia con los que se cuenta.

- El primer paso es determinar la energía diaria producida por un panel solar, ya que un panel de 540 WP produce esta cantidad de energía bajo las condiciones ideales de irradiancia de 1000 W/m². Sin embargo, para este cálculo, se seleccionarán las 4 horas más productivas según irradiancia de la situación más desfavorable: un día de invierno donde no hay tantas horas de luz solar y la irradiancia se refleja con menos fuerza, y se calculará la potencia que emitiría cada panel usando la siguiente ecuación:

$$Potencia\ Panel = \frac{540 * Irradiancia}{1000}$$

- Realizados los cálculos para las irradiancias de las horas de producción seleccionadas y se obtienen los siguientes resultados que quedan plasmados en la tabla 8 (Tabla 8), donde se plasma un extracto de la potencia generada es las horas de sol más productivas en un día de invierno, y que está referenciada además en la ilustración 6 (Ilustración 6) para aportar una idea más visual de la variación de la potencia generada en cada panel a lo largo de las horas seleccionadas de trabajo:

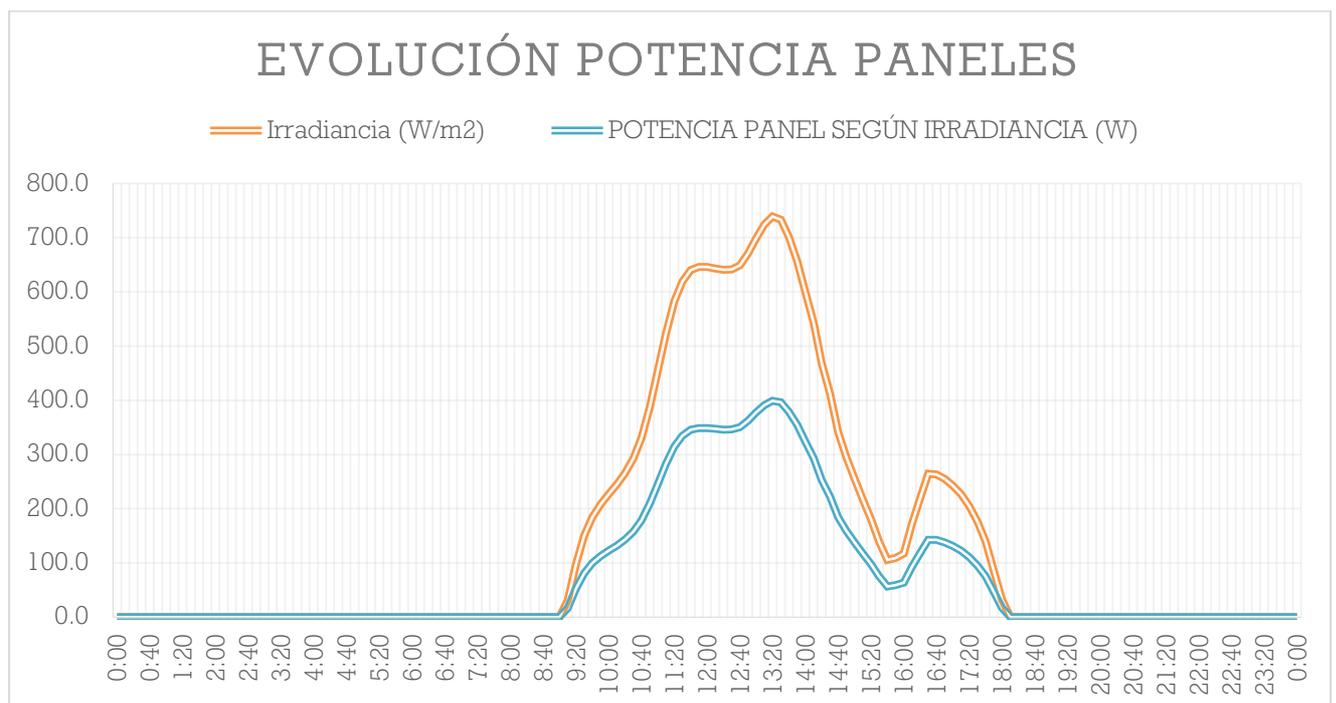


Ilustración 6: Evolución de la potencia generada por los paneles a lo largo del día en invierno (Ilustración de elaboración propia)

Tiempo (h)	Tª ambiente (°C)	Irradiancia (W/m²)	Potencia Panel según Irradiancia (W)
10:20	10.1	265.5	143.4
10:30	10.4	292.4	157.9
10:40	10.6	330.2	178.3
10:50	10.8	387.8	209.4
11:00	11.1	455.1	245.8
11:10	11.5	523.2	282.5
11:20	11.9	582.4	314.5
11:30	12.4	619.0	334.2
11:40	12.9	640.3	345.8
11:50	13.4	645.9	348.8
12:00	13.8	645.9	348.8
12:10	14.0	643.2	347.3
12:20	14.3	640.6	345.9
12:30	14.5	641.2	346.2
12:40	14.7	649.0	350.5
12:50	14.9	670.5	362.1
13:00	15.1	698.5	377.2
13:10	15.3	724.3	391.1
13:20	15.5	738.9	399.0
13:30	15.7	733.4	396.0
13:40	15.9	701.4	378.8
13:50	16.1	656.1	354.3
14:00	16.2	600.3	324.1
14:10	16.4	542.8	293.1
14:20	16.4	468.1	252.8
14:30	16.5	411.6	222.3
14:40	16.4	341.5	184.4
14:50	16.3	295.9	159.8

Tabla 8: Extracto de la potencia generada en las horas de sol más productivas de un día de invierno
(Tabla de elaboración propia)

o Cálculo del número de paneles solares

Una vez se calcula la potencia generada por cada panel, se dimensionará teniendo en cuenta de nuevo la situación más desfavorable en la generación de potencia para calcular el número de paneles necesarios para suplir la demanda en la peor de las situaciones.

Se usará la siguiente ecuación para obtener el número de placas y se obtienen los siguientes resultados:

$$N^{\circ}placas = \frac{Potencia\ necesaria}{Potencia\ minima\ panel} = \frac{8118.5}{143.4} = 57\ paneles$$

4.5. Cálculo de la energía a almacenar

o Estudio de la situación más desfavorable

En este caso, en verano, la irradiancia será mayor durante más horas cada día (Tabla 7), por lo que se generará mucha más energía y, por tanto, habrá más energía sobrante para almacenar que en invierno, época en la que solo se cuenta con alrededor de 4 horas de sol efectivas. Esto hace que la situación más desfavorable sea la descrita para verano, ya que como en verano se cuenta con una mayor cantidad de horas de sol diarias, alrededor de 13, los electrolizadores podrían estar funcionando durante 6 horas cada día a máxima potencia.

o Cálculo de la energía producida por panel en verano

Para ello se utilizará la potencia de cada panel que ya se había calculado previamente en el apartado 4.4, y se seguirá la siguiente ecuación:

$$\text{Energía generada por panel} = \text{Potencia por panel} * \frac{1}{\text{Horas de sol efectivas}}$$

Se adjuntan en Anexos 4 y 5 los datos en profundidad de la energía producida y se muestran aquí mediante una gráfica los resultados de la aplicación de la ecuación descrita anteriormente (Ilustración 7):

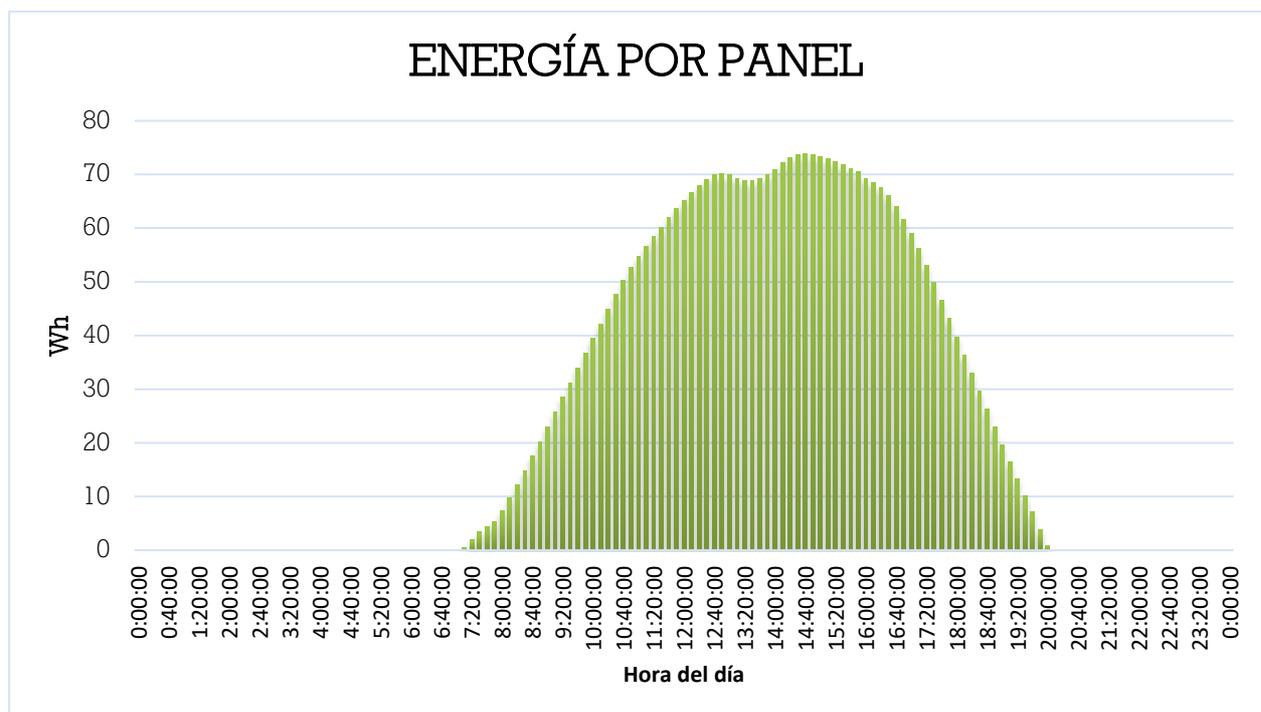


Ilustración 7: Evolución de la energía generada por un panel en un día de verano (Ilustración de elaboración propia)

Pese a que en verano se tendrán más horas de producción solar máxima y eficiente, se mantendrá fijo el número de paneles solares, lo cual implica un aumento considerable en la energía generada, y, por lo tanto, un aumento de la necesidad de almacenamiento, por lo que se diseña la instalación de almacenamiento para esta situación, siendo esta la máxima capacidad que se debería alcanzar de almacenamiento.

$$N^{\circ} \text{ paneles} = 57 \text{ paneles}$$

Haciendo la suma de la energía generada en cada hora se obtiene el siguiente resultado para la energía diaria por panel y en total para verano:

$$\text{Energía total generada en 1 panel} = 3568.2678 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía generada por el conjunto de paneles} = 203391.094 \text{ Wh}$$

Se hace lo mismo para invierno:

$$\text{Energía total generada en 1 panel} = 1808.16 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía generada por el conjunto de paneles} = 103065.08 \text{ Wh}$$

- o Cálculo de la potencia y energía consumida por los electrolizadores

Como en verano se cuenta con una mayor cantidad de horas de sol diarias, alrededor de 13, los electrolizadores podrían estar funcionando durante 6 horas cada día a máxima potencia.

$$\text{Horas de funcionamiento necesarias} = 12.92 = 13 \text{ horas}$$

$$\text{Potencia total electrolizadores} = 8118.5 \text{ W}$$

$$\text{Energía electrolizadores} = 104925.19 \text{ Wh}$$

- o Cálculo de la cantidad de energía que se debe almacenar

Por tanto, sabiendo la energía que consumen los electrolizadores, y la que producen los paneles, se obtiene la siguiente cantidad de energía para almacenar:

$$\text{Energía a almacenar verano} = \text{Energía paneles} - \text{Energía electrolizadores} = 98465.9 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía a almacenar invierno} = \text{Energía paneles} - \text{Energía electrolizadores} = -1860.1 \text{ Wh}$$

La energía que se debe almacenar en invierno se considera 0 al ver los resultados que se obtienen. Con estos resultados, se considera la situación de verano para hacer el dimensionamiento de la energía que se debe almacenar, ya que es la más desfavorable.

4.6. Cálculo del número de baterías

Una vez se ha calculado la energía que se precisa almacenar en el caso de máxima necesidad de almacenamiento, es necesario calcular el número de baterías que serían indispensables para almacenar esa energía. Para ello se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Selección características de la batería

El modelo de batería escogido es de ion-litio, que en base a características que se verán más adelante, es el que más casa con las necesidades de la instalación.

Según los datos del fabricante, la batería escogida tiene las siguientes características:

$$\begin{aligned} \text{Voltaje nominal} &= 25.6 \text{ V} \\ \text{Capacidad batería} &= 200 \text{ Ah} \end{aligned}$$

- Cálculo de la capacidad necesaria

Sabiendo la cantidad de energía que se debe almacenar y el voltaje de la batería, se obtiene que la capacidad total necesaria para la instalación sería la siguiente:

$$\text{Capacidad necesaria} = \frac{\text{Energía a almacenar}}{\text{Voltaje nominal}} = \frac{98465.9}{25.6} = 3846.3 \text{ Ah}$$

- Cálculo del número de baterías

$$N^{\circ} \text{baterías} = \frac{\text{Capacidad Necesaria}}{\text{Capacidad unidad}} = \frac{3846.3}{200} = 19.2 = 20 \text{ baterías}$$

En este, como en todos los cálculos, se redondea acercándose hacia el valor más alto, para así asegurar una buena cobertura en caso de fallo.

4.7. Cálculo de la capacidad de los tanques de almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento se realizará usando tanques a bajas presiones, ya que las características de seguridad y eficiencia que presenta esta tecnología se consideran acordes a las necesidades de la instalación, estando presurizado a 30 bares para minimizar el riesgo de explosión o incendio. Se han seguido los siguientes pasos:

- Definir las características del almacenamiento

Para calcular el número de tanques que son necesarios se parte de la cantidad de hidrógeno que se debe almacenar, que ya fue calculada en anterior apartado:

$$\text{Cantidad hidrogeno a almacenar} = 6462.11 \text{ L}$$

Se han solicitado catálogos de tanques de almacenamiento con estas características a empresas como Air Liquide, Lapesa e Idesa, pero al ser para un estudio de investigación no se ha obtenido respuesta.

Para poder solucionar el almacenamiento se ha supuesto un tanque de almacenamiento a 30 bares con capacidad para 600 litros de hidrógeno, y se han realizado los cálculos en base a esos datos.

- Cálculo del número de tanques necesarios

$$N^{\circ} \text{ tanques} = \frac{\text{Litros a almacenar}}{\text{Capacidad rack}} = \frac{6462.11}{600} = 10.8 = 11 \text{ tanques}$$

Con este número de tanques se podría garantizar el suministro constante de energía a la vivienda durante todo el día.

4.8. Resumen Cálculos

EQUIPO	DIMENSIONAMIENTO FINAL (N° EQUIPOS)
Placas Solares	57
Electrolizadores	4
Pilas de Combustible	3
Baterías	20
Tanques Almacenamiento	11

Tabla 9: Resumen Global Cálculos
(Tabla de elaboración propia)

Para todos los casos de dimensionamiento se ha optado por considerar la situación más desfavorable. Este enfoque se fundamenta en la necesidad de garantizar el suministro de energía a la vivienda incluso en condiciones adversas, tales como días nublados o periodos

prolongados sin luz solar. Al adoptar este riguroso criterio, se asegura que la instalación pueda satisfacer la demanda energética.

Es importante destacar que la selección de la situación más desfavorable implica tomar en cuenta los días de menos irradiancia solar del año, típicamente los días de invierno. Durante estos días, la cantidad de energía solar disponible se reduce significativamente, lo que representa el mayor desafío para la producción de energía. Al dimensionar los equipos y la cantidad de paneles solares basándose en estos escenarios extremos, se asegura que la instalación tenga la capacidad suficiente para operar eficientemente en cualquier condición.

La metodología empleada para el dimensionamiento abarca un análisis detallado de los datos de irradiancia, la capacidad de producción de los paneles solares y la demanda energética de la vivienda.

Se ha seleccionado paneles solares con una capacidad de 540 WP (Tabla 10), y se ha calculado la energía diaria producida teniendo en cuenta las horas solares productivas, que en el escenario más desfavorable se estiman en unas 4 horas al día. Estos cálculos y estimaciones han permitido hacer un correcto diseño de la instalación para asegurar un suministro energético continuo.

Además, se han considerado factores adicionales como la eficiencia de los equipos y la demanda diaria de hidrógeno. Al calcular la energía requerida para operar estos electrolizadores, hemos establecido que se necesitan al menos 57 paneles solares (Tabla 9) para cubrir la demanda energética.

El enfoque de dimensionar el sistema basándose en condiciones desfavorables no solo asegura, la sostenibilidad del suministro energético, sino que proporciona tranquilidad a los usuarios porque la fiabilidad del sistema está garantizada.

5. SELECCIÓN DE EQUIPOS

5.1. Introducción

Este apartado se dedica a explorar los criterios de selección que se han seguido para llevar a cabo la selección de los distintos equipos necesarios para construir la instalación, siendo cada uno de ellos esenciales para el correcto funcionamiento de esta.

Entre los criterios que se consideran destacan la eficiencia energética, la compatibilidad con el sistema general, la durabilidad, el mantenimiento y el impacto ambiental.

Al evaluar estos criterios, el objetivo es garantizar que los equipos seleccionados cumplan con los requisitos y contribuyan a la sostenibilidad y fiabilidad a largo plazo.

A continuación, se detallarán los criterios específicos utilizados para seleccionar cada tipo de equipo, justificando las elecciones realizadas y explicando su integración en el sistema.

Este proceso selectivo permitirá construir una base sólida para la implementación de una solución energética innovadora y eficiente que satisfaga las necesidades de la vivienda de manera integral.

5.2. Selección del Panel Fotovoltaico

En el ámbito de la energía solar fotovoltaica encontramos dos tecnologías que predominan el mercado actual:

- Paneles solares monocristalinos
- Paneles solares policristalinos.

Para esta instalación se han escogido los paneles solares monocristalinos, ya que presentan una serie de ventajas que provocan que destaque para el uso de la instalación frente a los policristalinos, algunas de las razones son las expuestas a continuación:

❖ Eficiencia

La eficiencia de conversión de los paneles monocristalinos ronda el 22%, que es más alta comparado con el 16% de eficiencia que proporcionan los paneles policristalinos. Este tipo de tecnología tiene un mejor rendimiento en condiciones de baja radiación solar, días nublados, durante las primeras y últimas horas de luz, etc. Esta capacidad para mantener condiciones óptimas en todo momento es crucial para proyectos como este, en el que se necesita una fuente de energía fiable.

❖ Durabilidad

Tienen una larga vida útil con una degradación anual inferior a la de los paneles policristalinos, por lo que mantendrán una mayor parte de su capacidad de generación de energía, lo que se traduce como una inversión más sólida a largo plazo.

❖ Compacidad

Los paneles escogidos son, también, más compactos en cuanto a diseño, lo cual es muy importante en instalaciones residenciales como la que se está estudiando, ya que se busca optimizar lo máximo posible el espacio con el que se cuenta con visión a poder implantarlo de otras formas en un futuro.

❖ Coste

Este tipo de panel tiene un coste más elevado que los paneles policristalinos, pero se considera en este caso justificado por la mayor producción de energía y los mínimos costes de mantenimiento a lo largo de su vida útil.

En conclusión, los paneles solares monocristalinos presentan ventajas significativas frente a los policristalinos, especialmente en términos de eficiencia, durabilidad, y compacidad.

Los paneles policristalinos siguen siendo una opción viable y económica, pero eligiendo paneles monocristalinos se asegura una inversión sólida y eficiente que maximiza el aprovechamiento de la energía solar disponible.

El modelo seleccionado para la instalación tiene las siguientes características, que quedan reflejadas en el catálogo del fabricante[28], pero se exponen a continuación las más relevantes para el estudio:

- **Tecnología:** Panel monocristalino, que es un dispositivo fabricado a partir de un único cristal de silicio de alta pureza y que se caracteriza por su alta eficiencia en la conversión de luz solar en electricidad.
- **Potencia Pico:** 540 WP, que genera esa cantidad en condiciones ideales de irradiancia, y hay que posteriormente adecuar a los datos de la instalación.

5.3. Selección de la Pila de Combustible

Las pilas de combustible son dispositivos que generan electricidad a través de una reacción electroquímica, comúnmente utilizando hidrógeno como combustible.

Existen varios tipos de pilas de combustible, cada una con características que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones:

- Pilas de Combustible de Membrana de Intercambio de Protón (PEMFC)
- Pilas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)
- Pilas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)
- Pilas de Combustible Alcalinas (AFC)

En este caso se ha optado por el uso de la tecnología de las pilas de combustible de membrana de intercambio de protón (PEM), ya que sus características, que han sido recopiladas de numerosos estudios y artículos de L. Fan, Z. Tu y S. H. Chan [30], S. Porstmann,

T. Wannemacher, y W. G. Drossel [31], N. Sazali, W. N. W. Salleh, A. S. Jamaludin y M. N. M. Razali [32] y Yun Wang, Yiheng Pang, Hui Xu, Andrew Martinez y Ken. S. Chen [33], son las que más encajan con las características de la instalación, tal y como se puede ver a continuación:

❖ Temperatura

Una de las ventajas que presenta este tipo de pilas frente a otras en el mercado es la baja temperatura de operación, que permite una rápida puesta en marcha y un manejo seguro de los materiales y componentes.

❖ Eficiencia

Tienen una eficiencia eléctrica de alrededor del 60%, lo cual es una ventaja frente a las otras tecnologías, que aportan eficiencias considerablemente menores.

❖ Durabilidad

La durabilidad y el mantenimiento son dos factores decisivos también, ya que este tipo de pilas requiere un mantenimiento mínimo debido a su temperatura de operación y a la estabilidad de sus componentes. La tecnología PEM está bien desarrollada, con numerosos avances en los últimos años que han mejorado su longevidad y fiabilidad.

❖ Versatilidad

Este tipo de pilas se utilizan en numerosas aplicaciones, y esa capacidad para operar en diferentes entornos la hace especialmente adecuada para proyectos como este en los que se busca un equipo flexible y capaz de adaptarse a cambios en la demanda.

En conclusión, este tipo de pilas ofrecen varias ventajas frente al resto de pilas del mercado, especialmente en términos de eficiencia, flexibilidad, durabilidad y aplicabilidad. Su operación a temperaturas moderadas/bajas, la alta eficiencia, el rápido tiempo de respuesta y su menor necesidad de almacenamiento las convierten en la solución idónea para este tipo de instalación.

Las características del modelo seleccionado quedan reflejadas en el catálogo del fabricante [34], y aquí se exponen las más influyentes para la instalación:

- **Referencia:** Ballard Power Systems Nexa Power Module
- **Tecnología:** Membrana de Intercambio Protónico (PEM), que es un dispositivo que genera electricidad mediante una reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno usando una membrana de intercambio de protones como electrolito.
- **Potencia:** 1200 W

5.4. Selección del Electrolizador

Actualmente, las dos tecnologías prominentes en el sector de los electrolizadores son las siguientes:

- Electrolizadores de Membrana de Intercambio de Protón (PEM)
- Electrolizadores Alcalinos

Se han estudiado las características de ambas tecnologías en relación con la instalación que se está realizando y se ha optado por usar la tecnología de los electrolizadores PEM, por las siguientes razones, que han sido validadas por los estudios de A. Pino Griego [35] y la información obtenida de Atlas Copco [23].

❖ Eficiencia

Los electrolizadores PEM destacan por su alta eficiencia y su capacidad para operar a densidades de corriente más elevadas en comparación a los electrolizadores alcalinos, por lo que tienen capacidad para producir más hidrógeno en un espacio más compacto y con mayor eficiencia energética, lo cual es crucial en instalaciones como la que se estudia, con espacio limitado y en la que se busca maximizar la producción de hidrógeno. La alta eficiencia de estos electrolizadores se traduce en menores costes operativos y una mejor utilización de los recursos energéticos disponibles.

❖ Tiempo de respuesta

Una de las ventajas más significativas es su rápida capacidad de respuesta, siendo capaces de ajustar rápidamente la producción de hidrógeno en función de la disponibilidad energética.

❖ Pureza hidrógeno

Producen hidrógeno de alta pureza sin necesidad de procesos adicionales de purificación, lo cual es particularmente importante en aplicaciones que requieren hidrógeno de alta calidad, como puede ser en la instalación para introducir ese hidrógeno en las pilas de combustible.

❖ Seguridad

Los electrolizadores PEM operan a presiones más bajas y tienen mejor riesgo de fugas de electrolito. Esta característica reduce los riesgos asociados con el manejo y la operación del sistema, haciendo que los electrolizadores sean más seguros y sencillos de mantener.

En conclusión, los electrolizadores PEM presentan una serie de ventajas que los hacen una opción superior frente a los electrolizadores alcalinos, especialmente en proyectos como este, en los que se busca la máxima eficiencia, flexibilidad y sostenibilidad. Su alta eficiencia,

rápida capacidad de respuesta, seguridad y facilidad de mantenimiento hacen que sea la opción más adecuada para las necesidades de nuestra instalación, ya que contribuyen de manera significativa a la reducción de la huella de carbono y a la promoción de prácticas energéticas sostenibles y responsables.

El modelo por el que se ha optado en la instalación es usado en el estudio de Gracia M. Cabello González, Sergio J. Navas Herrera y Francisco J. Pino [27]. Esta elección se debe a que el modelo cumple con el caudal de 500 l/h de hidrógeno que se necesita y garantiza que el hidrógeno salga a 30 bares, que es la misma presión que se usaría para almacenamiento, lo cual garantiza una homogeneización del sistema.

5.5. Selección de la tecnología de las baterías

En este estudio se han considerado dos tecnologías diferentes para las baterías:

- Ion-litio:
- Plomo ácido

En el contexto actual de avances tecnológicos y la creciente demanda de soluciones energéticas eficientes y sostenibles, la selección de baterías de ion-litio emerge como una opción superior frente a las baterías de plomo ácido en una variedad de aplicaciones.

Al estudiar las características de la instalación, se ha tomado la decisión de usar baterías de ion-litio basando la decisión en los conocimientos previos acerca de las mismas y la información recopilada en diferentes estudios y publicaciones de V. Quintero, O. Che, E. Ching, O. Auciello y E. De Obaldía [36], Naval Group [37] y CSIC [38]. Las ventajas que presentan, y por las que se ha escogido esta tecnología, quedan explicadas a continuación:

❖ Capacidad de almacenamiento

Este tipo de batería es muy reconocida por su alta densidad de energía en comparación con las baterías de plomo ácido, por lo que permitiría almacenar una mayor cantidad de energía en un espacio más reducido, lo cual ha sido crucial para las características de la instalación, ya que se debe priorizar la compactidad del sistema.

❖ Eficiencia

Exhiben también mayor eficiencia en la carga y descarga, alrededor del 95%, en comparación con las baterías de plomo ácido, en las que la eficiencia ronda el 70%.

❖ Vida útil

Otro aspecto fundamental es el ciclo de vida de las baterías, ya que las seleccionadas de ion-litio tienen una vida útil más larga en comparación con las de plomo ácido. Esta mayor durabilidad no solo reduce los costes de reemplazo a largo plazo, sino que minimiza también la cantidad de residuos generados, contribuyendo así a prácticas más sostenibles y responsables con el medio ambiente.

❖ Mantenimiento

Las baterías de ion-litio, además, requieren poco mantenimiento respecto a las de plomo ácido, que sufren riesgos de sulfatación.

❖ Seguridad

La seguridad es otro aspecto crucial en el que las baterías de ion-litio destacan, ya que los últimos avances tecnológicos han mejorado su diseño y fabricación, incorporando sistemas de gestión que monitorizan la temperatura, voltaje y corriente.

Teniendo en cuenta todos estos criterios, se ha optado por la selección de un modelo con las siguientes características, que se obtienen a partir del catálogo del fabricante [39], exponiendo a continuación las más significativas para la instalación:

- **Referencia:** NCL-LFPO-24200
- **Voltaje Nominal (V):** 25.6
- **Capacidad Nominal (Ah):** 200

En este caso, se ha optado por escoger baterías de mayor capacidad para optimizar el espacio, a pesar de que las ofertas incluían baterías con menor capacidad.

5.6. Selección del tanque almacenamiento

El almacenamiento del hidrógeno es un componente crucial en el desarrollo de sistemas de energía basados en hidrógeno.

Las principales tecnologías disponibles en el mercado son:

- Hidrógeno Comprimido
- Hidrógeno Líquido
- Hidruros Metálicos

Para este proyecto, se ha optado por el almacenamiento de hidrógeno a bajas presiones (en torno a 30 bar).

Almacenar hidrógeno a bajas presiones es una elección que ofrece múltiples ventajas y que puede llegar a ser crucial, se han expuesto a continuación alguna de estas ventajas:

❖ Seguridad

Estas bajas presiones aseguran máxima seguridad y aportan facilidades a la hora de manejar los tanques donde se almacena el hidrógeno. Se reduce drásticamente el riesgo de fugas y explosiones, lo cual puede llegar a ser crítico en una instalación de estas características.

❖ Coste

Tienen un coste más bajo que otras tecnologías y son muy fáciles de mantener. Esto los lleva a hacer viables en una amplia gama de aplicaciones, siendo una de ellas la que se está tratando.

En resumen, optar por este tipo de almacenamiento es una decisión estratégica que combina seguridad, eficiencia y economía. Es una alternativa altamente viable y segura gracias a los recientes avances tecnológicos y los nuevos materiales que han conseguido un almacenamiento eficiente y controlado del hidrógeno.

Los tanques están presurizados a 30 bar y tienen una alta capacidad permitiendo usar menos unidades y optimizar la instalación, según en el catálogo del fabricante. [40].

5.7. Conclusión selección de equipos

EQUIPO	CARÁCTERÍSTICAS
Placas Solares	540 WP
Electrolizadores	500 NI/h
Pila de Combustible	1200 W
Baterías	200 Ah
Tanque Almacenamiento	600 L

Tabla 10: Resumen Selección Equipos
(Tabla de elaboración propia)

A lo largo de este análisis de equipos, se han evaluado diversos componentes críticos, incluyendo paneles solares, electrolizadores, pilas de combustible, baterías y tanques de almacenamiento, donde cada uno de estos elementos ha jugado un papel crucial en la optimización global del sistema. La selección de las capacidades de cada equipo se ha resumido de forma más visual en la tabla 10 (Tabla 10).

La elección de paneles solares monocristalinos se destaca como la más adecuada debido a su alta eficiencia de conversión energética, durabilidad y menor requerimiento de espacio. El panel escogido es capaz de generar más electricidad por unidad de superficie y mantienen un rendimiento superior incluso en condiciones climatológicas adversas, lo que asegura un suministro constante de energía solar.

Los electrolizadores PEM se han seleccionado por su eficiencia y su capacidad de respuesta rápida, que encaja muy bien con la fuente de energía de la instalación (solar), además, operan a temperaturas bajas y por lo tanto son más seguros y reducen los costes de operación. Una de las razones más importantes de su elección se debe a que su funcionamiento se puede comprobar en estudios, y por ello se sabe que el hidrógeno sale a 30 bares, lo cual es ideal para el almacenamiento ya que no se tendrá que hacer ningún tipo de cambio de presión para conseguir almacenarlo de forma segura y eficaz.

En el ámbito de las pilas de combustible, las pilas de tecnología PEM (membrana de intercambio de protones) sobresalen debido a su eficiencia, condiciones de operación y versatilidad. Este tipo de pila permite una rápida puesta en marcha y ofrece durabilidad y fiabilidad, factores muy decisivos y necesarios en la instalación diseñada.

Las baterías de ion-litio se han seleccionado por su densidad energética, su eficiencia, vida útil, tamaño compacto y bajo mantenimiento. A pesar de su mayor coste inicial en comparación a las baterías de plomo ácido, su capacidad para soportar numerosos ciclos de carga y descarga sin una pérdida significativa de rendimiento las hace más rentables a largo plazo.

Por último, el almacenamiento en tanques a bajas presiones ofrece una solución segura para el manejo del hidrogeno y minimiza el riesgo de explosión o incendio.

En conclusión, la selección del conjunto de equipos cumple con las expectativas y las características de la vivienda, por lo que se garantizaría el correcto funcionamiento de esta.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha perseguido el ambicioso objetivo de construir una vivienda aislada de la red y autónoma energéticamente mediante el uso de tecnologías basadas en el hidrógeno. A lo largo del desarrollo del proyecto, se ha realizado un exhaustivo estudio de las diferentes tecnologías de generación de hidrógeno, seguido del diseño de un prototipo de instalación y la validación teórica mediante los cálculos realizados de su operación en un entorno residencial.

Inicialmente, se llevó a cabo una investigación profunda sobre las diversas tecnologías disponibles para la generación de hidrógeno. Este análisis incluyó métodos como la electrolisis, el reformado de metano, y otras técnicas emergentes. Cada tecnología fue evaluada en términos de viabilidad, eficiencia y sostenibilidad, buscando identificar la opción más adecuada para ser implementada en una vivienda aislada. La investigación reveló que la electrolisis, alimentada por fuentes de energía renovables, presenta una combinación óptima de eficiencia y sostenibilidad, siendo ideal para este tipo de aplicaciones residenciales.

Con la información obtenida del estudio de tecnologías, se procedió al diseño de un prototipo de instalación de hidrógeno. En el proceso del desarrollo de la instalación se consideraron aspectos como el espacio disponible en la vivienda, los costes de implantación y las medidas de seguridad necesarias. Se elaboró un esquema detallado del sistema, que incluye la producción de hidrógeno mediante electrolisis, su almacenamiento seguro en hidruros metálicos y su conversión en electricidad para satisfacer las necesidades energéticas de la vivienda, al igual que la integración de paneles solares fotovoltaicos en la vivienda para alimentar el proceso de electrolisis para así asegurar una fuente de energía completamente renovable y autónoma.

Posteriormente, se realizaron simulaciones y análisis teóricos para validar la operación del prototipo diseñado. Los resultados mostraron que el sistema es capaz de operar de manera eficiente y segura, proporcionando una solución viable para la autonomía energética de una vivienda. Además, se comprobó que la eficiencia del sistema es suficiente para mantener un suministro constante de energía, haciendo uso del hidrógeno almacenado durante periodos de baja producción solar.

A pesar de estos logros, surgen importantes interrogaciones sobre la viabilidad económica y la escalabilidad del sistema. La implementación de una instalación de hidrógeno en una vivienda aislada, como también se puede ver reflejado en el artículo de Maximino García Vigil en la edición cuatrimestral de la revista de Ingeniería, Innovación y Desarrollo [41], que propone al hidrógeno como un vector energético y por lo tanto, como una fuente de energía capaz de suministrar energía eléctrica a instalaciones como la estudiada en este trabajo, que presenta desafíos significativos en términos de costes iniciales y complejidad técnica. Los altos costes de los componentes y la necesidad de un mantenimiento especializado pueden hacer que este tipo de instalaciones sean difíciles de justificar económicamente a pequeña escala. No obstante, al considerar la aplicación de esta tecnología a mayor escala, como en comunidades o edificios multifamiliares, los beneficios económicos y operativos podrían ser más significativos. La economía de escala podría reducir los costes per cápita y aumentar la rentabilidad del sistema, haciendo que la inversión final sea más atractiva.

En resumen, este trabajo demuestra que es técnicamente viable construir una vivienda autónoma energéticamente mediante el uso de tecnologías basadas en hidrógeno.

Se ha diseñado y validado teóricamente un sistema que puede operar de manera eficiente y segura, proporcionando una solución sostenible para la independencia energética residencial. Sin embargo, la competitividad de los precios de mercado del hidrógeno, hacen que la rentabilidad económica de esta instalación a pequeña escala siga siendo un desafío, sugiriendo que una implementación a mayor escala podría ser más adecuada.

Este proyecto representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles y ofrece una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de las energías renovables y la autonomía energética, ya que la transición hacia energías renovables es hoy en día un hecho. Este modelo no solo es posible, sino tal vez necesario para asegurar un futuro sostenible para el resto de las generaciones.

La implementación de un sistema de estas características, basado en hidrógeno y energías renovables, ofrece una alternativa eficiente, segura y sostenible para el suministro de energía eléctrica.

En conclusión, se ha conseguido cumplir con los objetivos propuestos de forma inicial para el proyecto. A través de un análisis profundo de las diversas tecnologías de generación de hidrógeno, y su posterior estudio para analizar su posible adaptación a los requisitos del proyecto, se ha conseguido diseñar un prototipo óptimo para proporcionar un suministro de energía eléctrica a una vivienda aislada de la red eléctrica.

Esto no solo demuestra la viabilidad técnica del proyecto, sino que también remarca el compromiso con la innovación y la eficiencia en el desarrollo de energías limpias, teniendo en cuenta que es necesario seguir invirtiendo en la investigación de estos procesos para conseguir que poco a poco este tipo de instalaciones puedan ser mejoradas económicamente y se consiga optimizar su eficiencia a pequeña y gran escala.

REFERENCIAS

- [1] I. G. Matos, «LA CRISIS ENERGÉTICA Y EL CARBÓN TÉRMICO», 2022. Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-71/ignacio-garcia-matos.pdf>
- [2] «DIRECTIVA 2003/87/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO».
- [3] «Infografía - ¿Cómo se produce y se vende la electricidad de la UE?» Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/#:~:text=Un%20gr%C3%A1fico%20de%20anillos%20multinivel,a%20partir%20de%20energ%C3%ADa%20nuclear.>
- [4] «PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA», 2021.
- [5] Javier Brey, Pablo Monge, Manuel Casamayón, José Donoso, y Javier Díaz, «La crisis energética, oportunidad para las renovables», Madrid, 4 de noviembre de 2022. Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/11/04/companias/1667554122_890679.html
- [6] David Solera Rico, «PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO», 16 de julio de 2019. Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ariema.com/produccion-de-h2>
- [7] H. Huerta y J. Soler Herrero, «Tesis Doctoral». [En línea]. Disponible en: <http://zaguan.unizar.es>
- [8] David Nuevo, «El Reformado con Vapor». [En línea]. Disponible en: <https://eshidrogeno.com/reformado/>
- [9] «Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior».
- [10] M. B. Fernández, P. Rodríguez, y M. Cantarell, «“Fotocatálisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en Gran Vía” Trabajo Fin de Grado».
- [11] «169421171002».
- [12] Genia Global Energy, «Los Diferentes Tipos De Hidrógeno Según Sus Colores». Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://geniaglobal.com/tipos-de-hidrogeno-segun-colores/>
- [13] Apilados, «3 métodos para el almacenamiento de hidrógeno», *Apilados*, [En línea]. Disponible en: <https://apilados.com/blog/3-metodos-almacenamiento-hidrogeno/>
- [14] A. Pino Priego, «Almacenamiento de Hidrógeno».
- [15] TUVSUD, «ALMACENAMIENTO Y PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO». [En línea]. Disponible en: <https://www.tuvsud.com/es-es/temas/hidrogeno/cadena-valor-hidrogeno/almacenaje-y-distribucion-hidrogeno>
- [16] Laura Pérez, «Métodos de almacenamiento del hidrógeno», 2022. [En línea]. Disponible en: <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
- [17] «Investigación Química Introducción», 2012. [En línea]. Disponible en: www.rseq.org
- [18] «Pilas de Combustible». [En línea]. Disponible en: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>

- [19] «Pila de combustible de membrana de intercambio protónico». [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible_de_membrana_de_intercambio_prot%C3%B3nico#cite_note-NTRS2-1
- [20] B. Millington, S. Du, y B. G. Pollet, «The effect of materials on proton exchange membrane fuel cell electrode performance», *J Power Sources*, vol. 196, n.º 21, pp. 9013-9017, nov. 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.12.043.
- [21] Asociación Española de Pilas de Combustible, «PILAS DE COMBUSTIBLE DE CARBONATOS FUNDIDOS». [En línea]. Disponible en: <https://appice.es/pilas-de-combustible-de-carbonatos-fundidos/>
- [22] S. P. S. Badwal, S. Giddey, C. Munnings, y A. Kulkarni, «Review of Progress in High Temperature Solid Oxide Fuel Cells», 2014. [En línea]. Disponible en: www.austceram.com/ACS-Journal
- [23] Atlas Copco, «Su guía sobre electrolizadores para la producción de hidrógeno». Accedido: 11 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/wiki/compressed-air-articles/electrolyzers-as-hydrogen-production-technologies>
- [24] Javier López de Benito, «¿Cuándo será más barato producir hidrógeno verde que hidrógeno gris?» Accedido: 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hidrogeno-verde.es/cuando-sera-mas-barato-producir-hidrogeno-verde-que-gris/>
- [25] UnivDatos, «Mercado del hidrógeno verde: análisis actual y pronóstico (2023-2030)», Accedido: 26 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://univdatos.com/es/report/green-hydrogen-market/>
- [26] «Acuerdo de paris»,
- [27] S. J. Navas, G. M. Cabello González, y F. J. Pino, «Hybrid power-heat microgrid solution using hydrogen as an energy vector for residential houses in Spain. A case study», *Energy Convers Manag*, vol. 263, jul. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115724.
- [28] «Tenka-Solar-Orion-Serie-5-540-555-Wattdf-compressed».
- [29] «Almacenamiento fijo modular para Hidrógeno. Descripción General». [En línea]. Disponible en: www.calvera.es
- [30] L. Fan, Z. Tu, y S. H. Chan, «Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review», 1 de noviembre de 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.egy.2021.08.003.
- [31] S. Porstmann, T. Wannemacher, y W. G. Drossel, «A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends», 1 de diciembre de 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.10.041.
- [32] N. Sazali, W. N. W. Salleh, A. S. Jamaludin, y M. N. M. Razali, «New perspectives on fuel cell technology: A brief review», 1 de mayo de 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/membranes10050099.
- [33] Yun Wang, Yiheng Pang, Hui Xu, Andrew Martinez, y Ken S. Chen, «PEM Fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development – a review», 2022. Accedido: 12 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2003/6e/d2ee00790h/unauth>
- [34] «Nexa ® 1200», 2011. [En línea]. Disponible en: www.heliocentris.com

- [35] A. Pino Priego, «Electrolizadores».
- [36] V. Quintero, O. Che, E. Ching, O. Auciello, E. De Obaldía, y * Autor, «Baterías de ion litio: características y aplicaciones Lithium ion batteries: features and applications Universidad de Texas en Dallas». [En línea]. Disponible en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>
- [37] «Corporate sensitivity PUBLIC».
- [38] «Artículos Artículos 5 Redes Orgánicas Covalentes: nuevos polímeros orgánicos multifuncionales para aplicaciones en energía». [En línea]. Disponible en: www.ictp.csic.es/fe/elastomers/
- [39] «Next labs CitY BATERÍAS LiFePO 4».
- [40] H2 PLANET, «Detalles Técnicos Almacenamiento Hidruros Metálicos». Accedido: 12 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.h2planet.eu/es/landing_page/myh2%C2%AE
- [41] «Revista Cuatrimestral de Ingeniería, Industria e Innovación». [En línea]. Disponible en: www.acreditacioncogitidpc.es

ANEXOS

❖ Anexo 1: Datos Irradiancia Invierno

Tiempo (h)	T ^a ambiente (°C)	Irradiancia (W/m ²)
0:00	12.3	0.0
0:10	12.2	0.0
0:20	12.1	0.0
0:30	12.0	0.0
0:40	11.9	0.0
0:50	11.8	0.0
1:00	11.7	0.0
1:10	11.6	0.0
1:20	11.5	0.0
1:30	11.4	0.0
1:40	11.3	0.0
1:50	11.2	0.0
2:00	11.1	0.0
2:10	11.0	0.0
2:20	10.9	0.0
2:30	10.8	0.0
2:40	10.7	0.0
2:50	10.6	0.0
3:00	10.5	0.0
3:10	10.4	0.0
3:20	10.3	0.0
3:30	10.2	0.0
3:40	10.1	0.0
3:50	10.0	0.0
4:00	9.9	0.0
4:10	9.8	0.0
4:20	9.7	0.0
4:30	9.6	0.0
4:40	9.5	0.0
4:50	9.4	0.0
5:00	9.3	0.0
5:10	9.2	0.0
5:20	9.1	0.0
5:30	9.0	0.0
5:40	8.9	0.0
5:50	8.8	0.0
6:00	8.7	0.0
6:10	8.6	0.0
6:20	8.5	0.0

6:30	8.4	0.0
6:40	8.3	0.0
6:50	8.2	0.0
7:00	8.1	0.0
7:10	8.0	0.0
7:20	7.9	0.0
7:30	7.8	0.0
7:40	7.7	0.0
7:50	7.6	0.0
8:00	7.5	0.0
8:10	7.4	0.0
8:20	7.3	0.0
8:30	7.2	0.0
8:40	7.1	0.0
8:50	7.0	0.0
9:00	6.9	0.0
9:10	6.8	30.7
9:20	7.1	96.0
9:30	7.6	149.9
9:40	8.3	184.0
9:50	9.0	207.9
10:00	9.5	226.7
10:10	9.9	244.7
10:20	10.1	265.5
10:30	10.4	292.4
10:40	10.6	330.2
10:50	10.8	387.8
11:00	11.1	455.1
11:10	11.5	523.2
11:20	11.9	582.4
11:30	12.4	619.0
11:40	12.9	640.3
11:50	13.4	645.9
12:00	13.8	645.9
12:10	14.0	643.2
12:20	14.3	640.6
12:30	14.5	641.2
12:40	14.7	649.0
12:50	14.9	670.5
13:00	15.1	698.5
13:10	15.3	724.3
13:20	15.5	738.9
13:30	15.7	733.4
13:40	15.9	701.4
13:50	16.1	656.1
14:00	16.2	600.3

14:10	16.4	542.8
14:20	16.4	468.1
14:30	16.5	411.6
14:40	16.4	341.5
14:50	16.3	295.9
15:00	16.2	255.3
15:10	16.0	217.9
15:20	15.8	180.8
15:30	15.5	139.6
15:40	15.2	105.3
15:50	14.9	108.9
16:00	14.7	117.3
16:10	14.5	171.3
16:20	14.4	219.7
16:30	14.3	264.3
16:40	14.3	263.4
16:50	14.2	254.8
17:00	14.1	242.8
17:10	13.9	226.6
17:20	13.8	204.9
17:30	13.6	175.9
17:40	13.5	139.5
17:50	13.3	85.0
18:00	13.2	32.2
18:10	13.0	0.0
18:20	12.8	0.0
18:30	12.6	0.0
18:40	12.4	0.0
18:50	12.2	0.0
19:00	12.0	0.0
19:10	11.8	0.0
19:20	11.7	0.0
19:30	11.6	0.0
19:40	11.5	0.0
19:50	11.4	0.0
20:00	11.3	0.0
20:10	11.1	0.0
20:20	11.1	0.0
20:30	11.0	0.0
20:40	10.9	0.0
20:50	10.8	0.0
21:00	10.7	0.0
21:10	10.5	0.0
21:20	10.4	0.0
21:30	10.3	0.0
21:40	10.2	0.0
21:50	10.1	0.0

22:00	10.0	0.0
22:10	9.8	0.0
22:20	9.7	0.0
22:30	9.7	0.0
22:40	9.6	0.0
22:50	9.5	0.0
23:00	9.4	0.0
23:10	9.2	0.0
23:20	9.1	0.0
23:30	9.0	0.0
23:40	8.9	0.0
23:50	8.8	0.0
0:00	8.7	0.0

Tabla 1A: Datos Irradiancia Invierno (Anexo 1)

❖ Anexo 2: Datos Irradiancia Verano

Tiempo (h)	T ^a ambiente °C	Irradiancia W/m ² K
0:00	23.6	0.0
0:10	23.4	0.0
0:20	23.2	0.0
0:30	23.0	0.0
0:40	22.9	0.0
0:50	22.7	0.0
1:00	22.6	0.0
1:10	22.4	0.0
1:20	22.3	0.0
1:30	22.1	0.0
1:40	21.9	0.0
1:50	21.8	0.0
2:00	21.6	0.0
2:10	21.4	0.0
2:20	21.3	0.0
2:30	21.1	0.0
2:40	20.9	0.0
2:50	20.8	0.0
3:00	20.6	0.0
3:10	20.4	0.0
3:20	20.3	0.0
3:30	20.1	0.0
3:40	19.9	0.0
3:50	19.8	0.0
4:00	19.6	0.0
4:10	19.4	0.0
4:20	19.2	0.0
4:30	19.0	0.0
4:40	18.9	0.0
4:50	18.7	0.0
5:00	18.5	0.0
5:10	18.3	0.0
5:20	18.2	0.0
5:30	18.0	0.0
5:40	17.8	0.0
5:50	17.7	0.0
6:00	17.5	0.0
6:10	17.3	0.0
6:20	17.2	0.0
6:30	17.0	0.0
6:40	16.8	0.0
6:50	16.7	0.0

7:00	16.5	0.0
7:10	16.4	5.7
7:20	16.6	22.3
7:30	17.2	38.6
7:40	17.8	48.7
7:50	18.6	58.3
8:00	19.2	82.7
8:10	19.6	108.8
8:20	20.0	136.3
8:30	20.4	164.9
8:40	20.7	194.4
8:50	21.1	224.6
9:00	21.5	255.0
9:10	21.9	285.4
9:20	22.3	316.3
9:30	22.7	346.2
9:40	23.0	376.6
9:50	23.4	407.2
10:00	23.8	437.9
10:10	24.2	468.7
10:20	24.6	499.3
10:30	24.9	529.7
10:40	25.3	559.4
10:50	25.7	585.7
11:00	26.0	608.9
11:10	26.4	629.8
11:20	26.7	649.3
11:30	27.0	668.4
11:40	27.3	687.8
11:50	27.6	706.8
12:00	27.9	724.7
12:10	28.1	741.2
12:20	28.4	755.7
12:30	28.7	767.9
12:40	29.0	776.6
12:50	29.3	779.0
13:00	29.5	776.5
13:10	29.7	770.0
13:20	29.9	765.9
13:30	30.0	764.7
13:40	30.2	768.9
13:50	30.3	777.4
14:00	30.4	788.1
14:10	30.6	801.9
14:20	30.7	812.0
14:30	30.8	818.6

14:40	31.0	820.2
14:50	31.1	818.8
15:00	31.2	815.4
15:10	31.4	810.4
15:20	31.5	804.2
15:30	31.6	797.4
15:40	31.7	790.5
15:50	31.8	784.1
16:00	31.9	769.5
16:10	31.9	761.8
16:20	32.0	750.4
16:30	32.0	734.1
16:40	32.1	711.7
16:50	32.1	685.4
17:00	32.1	656.0
17:10	32.1	623.7
17:20	32.1	589.5
17:30	32.0	553.6
17:40	32.0	516.6
17:50	31.9	479.3
18:00	31.8	441.8
18:10	31.6	404.0
18:20	31.5	366.4
18:30	31.3	328.9
18:40	31.1	291.7
18:50	30.9	254.8
19:00	30.6	218.4
19:10	30.4	182.9
19:20	30.1	147.6
19:30	29.8	113.4
19:40	29.5	79.3
19:50	29.2	42.5
20:00	28.9	10.2
20:10	28.7	0.0
20:20	28.5	0.0
20:30	28.3	0.0
20:40	28.1	0.0
20:50	27.9	0.0
21:00	27.7	0.0
21:10	27.5	0.0
21:20	27.3	0.0
21:30	27.1	0.0
21:40	27.0	0.0
21:50	26.8	0.0
22:00	26.6	0.0
22:10	26.4	0.0
22:20	26.2	0.0

22:30	26.0	0.0
22:40	25.9	0.0
22:50	25.7	0.0
23:00	25.5	0.0
23:10	25.3	0.0
23:20	25.1	0.0
23:30	24.9	0.0
23:40	24.7	0.0
23:50	24.4	0.0
0:00	24.3	0.0

Tabla 2A: Datos Irradiancia Verano (Anexo 2)

❖ Anexo 3: Demanda energética residencia

HORA DEL DIA	Wh
0:00	473.1
1:00	192.3
2:00	164.7
3:00	182.2
4:00	160.2
5:00	279.2
6:00	282.8
7:00	409.9
8:00	204.7
9:00	322.4
10:00	1231.5
11:00	212.3
12:00	154.7
13:00	294.0
14:00	296.2
15:00	430.7
16:00	390.2
17:00	435.5
18:00	446.1
19:00	728.2
20:00	560.7
21:00	571.7
22:00	755.8
23:00	296.5

Tabla 3A: Demanda Energética Residencia (Anexo 3)

❖ Anexo 4: Evolución de la potencia generada por un panel para los datos de irradiancia de un día de invierno

Tiempo (h)	T ^a ambiente (°C)	Irradiancia (W/m ²)	Potencia Panel según Irradiancia (W)
0:00	12.3	0.0	0.0
0:10	12.2	0.0	0.0
0:20	12.1	0.0	0.0
0:30	12.0	0.0	0.0
0:40	11.9	0.0	0.0
0:50	11.8	0.0	0.0
1:00	11.7	0.0	0.0
1:10	11.6	0.0	0.0
1:20	11.5	0.0	0.0
1:30	11.4	0.0	0.0
1:40	11.3	0.0	0.0
1:50	11.2	0.0	0.0
2:00	11.1	0.0	0.0
2:10	11.0	0.0	0.0
2:20	10.9	0.0	0.0
2:30	10.8	0.0	0.0
2:40	10.7	0.0	0.0
2:50	10.6	0.0	0.0
3:00	10.5	0.0	0.0
3:10	10.4	0.0	0.0
3:20	10.3	0.0	0.0
3:30	10.2	0.0	0.0
3:40	10.1	0.0	0.0
3:50	10.0	0.0	0.0
4:00	9.9	0.0	0.0
4:10	9.8	0.0	0.0
4:20	9.7	0.0	0.0
4:30	9.6	0.0	0.0
4:40	9.5	0.0	0.0
4:50	9.4	0.0	0.0
5:00	9.3	0.0	0.0
5:10	9.2	0.0	0.0
5:20	9.1	0.0	0.0
5:30	9.0	0.0	0.0
5:40	8.9	0.0	0.0
5:50	8.8	0.0	0.0
6:00	8.7	0.0	0.0
6:10	8.6	0.0	0.0
6:20	8.5	0.0	0.0
6:30	8.4	0.0	0.0
6:40	8.3	0.0	0.0
6:50	8.2	0.0	0.0

7:00	8.1	0.0	0.0
7:10	8.0	0.0	0.0
7:20	7.9	0.0	0.0
7:30	7.8	0.0	0.0
7:40	7.7	0.0	0.0
7:50	7.6	0.0	0.0
8:00	7.5	0.0	0.0
8:10	7.4	0.0	0.0
8:20	7.3	0.0	0.0
8:30	7.2	0.0	0.0
8:40	7.1	0.0	0.0
8:50	7.0	0.0	0.0
9:00	6.9	0.0	0.0
9:10	6.8	30.7	16.6
9:20	7.1	96.0	51.8
9:30	7.6	149.9	80.9
9:40	8.3	184.0	99.4
9:50	9.0	207.9	112.3
10:00	9.5	226.7	122.4
10:10	9.9	244.7	132.1
10:20	10.1	265.5	143.4
10:30	10.4	292.4	157.9
10:40	10.6	330.2	178.3
10:50	10.8	387.8	209.4
11:00	11.1	455.1	245.8
11:10	11.5	523.2	282.5
11:20	11.9	582.4	314.5
11:30	12.4	619.0	334.2
11:40	12.9	640.3	345.8
11:50	13.4	645.9	348.8
12:00	13.8	645.9	348.8
12:10	14.0	643.2	347.3
12:20	14.3	640.6	345.9
12:30	14.5	641.2	346.2
12:40	14.7	649.0	350.5
12:50	14.9	670.5	362.1
13:00	15.1	698.5	377.2
13:10	15.3	724.3	391.1
13:20	15.5	738.9	399.0
13:30	15.7	733.4	396.0
13:40	15.9	701.4	378.8
13:50	16.1	656.1	354.3
14:00	16.2	600.3	324.1
14:10	16.4	542.8	293.1
14:20	16.4	468.1	252.8
14:30	16.5	411.6	222.3
14:40	16.4	341.5	184.4

14:50	16.3	295.9	159.8
15:00	16.2	255.3	137.9
15:10	16.0	217.9	117.7
15:20	15.8	180.8	97.6
15:30	15.5	139.6	75.4
15:40	15.2	105.3	56.8
15:50	14.9	108.9	58.8
16:00	14.7	117.3	63.4
16:10	14.5	171.3	92.5
16:20	14.4	219.7	118.6
16:30	14.3	264.3	142.7
16:40	14.3	263.4	142.2
16:50	14.2	254.8	137.6
17:00	14.1	242.8	131.1
17:10	13.9	226.6	122.4
17:20	13.8	204.9	110.6
17:30	13.6	175.9	95.0
17:40	13.5	139.5	75.3
17:50	13.3	85.0	45.9
18:00	13.2	32.2	17.4
18:10	13.0	0.0	0.0
18:20	12.8	0.0	0.0
18:30	12.6	0.0	0.0
18:40	12.4	0.0	0.0
18:50	12.2	0.0	0.0
19:00	12.0	0.0	0.0
19:10	11.8	0.0	0.0
19:20	11.7	0.0	0.0
19:30	11.6	0.0	0.0
19:40	11.5	0.0	0.0
19:50	11.4	0.0	0.0
20:00	11.3	0.0	0.0
20:10	11.1	0.0	0.0
20:20	11.1	0.0	0.0
20:30	11.0	0.0	0.0
20:40	10.9	0.0	0.0
20:50	10.8	0.0	0.0
21:00	10.7	0.0	0.0
21:10	10.5	0.0	0.0
21:20	10.4	0.0	0.0
21:30	10.3	0.0	0.0
21:40	10.2	0.0	0.0
21:50	10.1	0.0	0.0
22:00	10.0	0.0	0.0
22:10	9.8	0.0	0.0
22:20	9.7	0.0	0.0

22:30	9.7	0.0	0.0
22:40	9.6	0.0	0.0
22:50	9.5	0.0	0.0
23:00	9.4	0.0	0.0
23:10	9.2	0.0	0.0
23:20	9.1	0.0	0.0
23:30	9.0	0.0	0.0
23:40	8.9	0.0	0.0
23:50	8.8	0.0	0.0
0:00	12.3	0.0	0.0

Tabla 4A: Evolución de la potencia generada por un panel para los datos de irradiancia de un día de invierno (Anexo 4)

❖ Anexo 5: Datos de irradiancia, potencia generada por panel y energía generada para un día de verano

Tiempo (h)	Irradiancia (W/m^2)	Potencia panel según irradiancia (W)	Energía por panel (Wh)
0:00	12.3	0.0	0.0
0:10	12.2	0.0	0.0
0:20	12.1	0.0	0.0
0:30	12.0	0.0	0.0
0:40	11.9	0.0	0.0
0:50	11.8	0.0	0.0
1:00	11.7	0.0	0.0
1:10	11.6	0.0	0.0
1:20	11.5	0.0	0.0
1:30	11.4	0.0	0.0
1:40	11.3	0.0	0.0
1:50	11.2	0.0	0.0
2:00	11.1	0.0	0.0
2:10	11.0	0.0	0.0
2:20	10.9	0.0	0.0
2:30	10.8	0.0	0.0
2:40	10.7	0.0	0.0
2:50	10.6	0.0	0.0
3:00	10.5	0.0	0.0
3:10	10.4	0.0	0.0
3:20	10.3	0.0	0.0
3:30	10.2	0.0	0.0
3:40	10.1	0.0	0.0
3:50	10.0	0.0	0.0
4:00	9.9	0.0	0.0
4:10	9.8	0.0	0.0
4:20	9.7	0.0	0.0
4:30	9.6	0.0	0.0
4:40	9.5	0.0	0.0
4:50	9.4	0.0	0.0
5:00	9.3	0.0	0.0
5:10	9.2	0.0	0.0
5:20	9.1	0.0	0.0
5:30	9.0	0.0	0.0
5:40	8.9	0.0	0.0
5:50	8.8	0.0	0.0
6:00	8.7	0.0	0.0
6:10	8.6	0.0	0.0
6:20	8.5	0.0	0.0
6:30	8.4	0.0	0.0
6:40	8.3	0.0	0.0

6:50	8.2	0.0	0.0
7:00	8.1	0.0	0.0
7:10	8.0	0.0	0.0
7:20	7.9	0.0	0.0
7:30	7.8	0.0	0.0
7:40	7.7	0.0	0.0
7:50	7.6	0.0	0.0
8:00	7.5	0.0	0.0
8:10	7.4	0.0	0.0
8:20	7.3	0.0	0.0
8:30	7.2	0.0	0.0
8:40	7.1	0.0	0.0
8:50	7.0	0.0	0.0
9:00	6.9	0.0	0.0
9:10	6.8	30.7	16.6
9:20	7.1	96.0	51.8
9:30	7.6	149.9	80.9
9:40	8.3	184.0	99.4
9:50	9.0	207.9	112.3
10:00	9.5	226.7	122.4
10:10	9.9	244.7	132.1
10:20	10.1	265.5	143.4
10:30	10.4	292.4	157.9
10:40	10.6	330.2	178.3
10:50	10.8	387.8	209.4
11:00	11.1	455.1	245.8
11:10	11.5	523.2	282.5
11:20	11.9	582.4	314.5
11:30	12.4	619.0	334.2
11:40	12.9	640.3	345.8
11:50	13.4	645.9	348.8
12:00	13.8	645.9	348.8
12:10	14.0	643.2	347.3
12:20	14.3	640.6	345.9
12:30	14.5	641.2	346.2
12:40	14.7	649.0	350.5
12:50	14.9	670.5	362.1
13:00	15.1	698.5	377.2
13:10	15.3	724.3	391.1
13:20	15.5	738.9	399.0
13:30	15.7	733.4	396.0
13:40	15.9	701.4	378.8
13:50	16.1	656.1	354.3
14:00	16.2	600.3	324.1
14:10	16.4	542.8	293.1
14:20	16.4	468.1	252.8
14:30	16.5	411.6	222.3

14:40	16.4	341.5	184.4
14:50	16.3	295.9	159.8
15:00	16.2	255.3	137.9
15:10	16.0	217.9	117.7
15:20	15.8	180.8	97.6
15:30	15.5	139.6	75.4
15:40	15.2	105.3	56.8
15:50	14.9	108.9	58.8
16:00	14.7	117.3	63.4
16:10	14.5	171.3	92.5
16:20	14.4	219.7	118.6
16:30	14.3	264.3	142.7
16:40	14.3	263.4	142.2
16:50	14.2	254.8	137.6
17:00	14.1	242.8	131.1
17:10	13.9	226.6	122.4
17:20	13.8	204.9	110.6
17:30	13.6	175.9	95.0
17:40	13.5	139.5	75.3
17:50	13.3	85.0	45.9
18:00	13.2	32.2	17.4
18:10	13.0	0.0	0.0
18:20	12.8	0.0	0.0
18:30	12.6	0.0	0.0
18:40	12.4	0.0	0.0
18:50	12.2	0.0	0.0
19:00	12.0	0.0	0.0
19:10	11.8	0.0	0.0
19:20	11.7	0.0	0.0
19:30	11.6	0.0	0.0
19:40	11.5	0.0	0.0
19:50	11.4	0.0	0.0
20:00	11.3	0.0	0.0
20:10	11.1	0.0	0.0
20:20	11.1	0.0	0.0
20:30	11.0	0.0	0.0
20:40	10.9	0.0	0.0
20:50	10.8	0.0	0.0
21:00	10.7	0.0	0.0
21:10	10.5	0.0	0.0
21:20	10.4	0.0	0.0
21:30	10.3	0.0	0.0
21:40	10.2	0.0	0.0
21:50	10.1	0.0	0.0
22:00	10.0	0.0	0.0
22:10	9.8	0.0	0.0

22:20	9.7	0.0	0.0
22:30	9.7	0.0	0.0
22:40	9.6	0.0	0.0
22:50	9.5	0.0	0.0
23:00	9.4	0.0	0.0
23:10	9.2	0.0	0.0
23:20	9.1	0.0	0.0
23:30	9.0	0.0	0.0
23:40	8.9	0.0	0.0
23:50	8.8	0.0	0.0
0:00	8.7	0.0	0.0

Tabla 5A: Evolución de la potencia generada por un panel para los datos de irradiancia de un día de verano (Anexo 5)

