

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería de la Energía

### Simulación de una microrred basada en energías renovables y tecnología del hidrógeno usando TRNSYS

Autor: Francisco Ruiz Rodríguez

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Sevilla, 2023





Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería de la Energía

Simulación de una microrred basada en energías  
renovables y tecnología del hidrógeno usando  
TRNSYS

Autor:

Francisco Ruiz Rodríguez

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena  
Profesor Titular de Universidad

Dep. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera: Simulación de una microrred basada en energías renovables y tecnología del hidrógeno usando TRNSYS

Autor: Francisco Ruiz Rodríguez

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis amigos*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

El que da, se olvida; el que recibe debe recordar. Por ello, hago referencia a todas aquellas personas que persistieron, apoyaron y confiaron en todo momento. Familia, amigos...

Además, es de agradecer a todos los profesores con vocación de la Escuela que me han transmitido sus valiosos conocimientos y en especial a Francisco Javier Pino Lucena, que en todo momento resolvió dudas, problemas y ayudo con sus grandes dotes tecnológicos...

Como dijo Albert Einstein - "La vida es una preparación para el futuro; y la mejor preparación para el futuro es vivir como si no hubiera ninguno"



# Resumen

---

Con motivo del calentamiento climático aparecen combustibles alternativos para la generación de energía y es el hidrógeno el combustible que cobra cada día más importancia. En cambio, la transición desde combustibles fósiles hacia energías renovables no es fácil y requiere grandes desembolsos e investigación para su implantación.

Además, nacen las microrredes como una opción descentralizada capaz de coordinar y gestionar los sistemas de energía renovable, tal que disminuye la capacidad de coordinación y gestión de los sistemas centralizados. Es por ello por lo que las grandes potencias mundiales (China, Japón...) apuesten por sistemas autónomos que puedan trabajar desconectados de la red central.

Entonces, este trabajo enlaza con dos tecnologías con gran potencial de mejora. Por un lado, el hidrógeno verde, vector energético ya que necesita de energía para ser extraído y cuenta con la ventaja de ser capaz de almacenar energía para ser inyectada en la red cuando sea oportuno. Y, por otro lado, las microrredes, pueden operar de forma independiente cuando es desconectada de la red eléctrica principal en caso de crisis.

La parte más importante del trabajo es el caso práctico realizado. A través del Software TRNSYS se realiza un estudio de una microrred basada en energía renovable y tecnología de hidrógeno. Se crea un proyecto en el que interconectan instalación fotovoltaica, electrolizador, pila de combustible, tanque de hidrógeno... Siendo los parámetros de estudio el estado de carga del tanque de almacenamiento de hidrógeno y el sistema de respaldo, la batería de plomo ácido. Además, se analiza la cobertura demandada por el sistema y los porcentajes de carga y descarga. Por otro lado, se realiza un segundo caso en el que el sistema de respaldo es el almacenamiento de hidrógeno.

Por último, se realiza un análisis de sensibilidad para estudiar cómo varía el sistema con cambios en el volumen de almacenamiento, variando en torno al diez por ciento.



# Abstract

---

Due to climate warming, alternative fuels for power generation appear and hydrogen is the fuel that is becoming more important every day. On the other hand, the transition from fossil fuels to renewable energies is not easy and requires large outlays and research for its implementation.

In addition, microgrids are born as a decentralized option capable of coordinating and managing renewable energy systems, such that the coordination and management capacity of centralized systems decreases. That is why the great world powers (China, Japan...) are committed to autonomous systems that can work disconnected from the central network.

So, this work links to two technologies with great potential for improvement. On the one hand, green hydrogen, an energy vector since it needs energy to be extracted and has the advantage of being able to store energy to be injected into the grid when appropriate. And, on the other hand, microgrids can operate independently when disconnected from the main power grid in the event of a crisis.

The most important part of the work is the practical case carried out. Through the TRNSYS Software, a study of a microgrid based on renewable energy and hydrogen technology is carried out. A project is created in which the photovoltaic installation, electrolyzer, fuel cell, hydrogen tank are interconnected... The study parameters are the state of charge of the hydrogen storage tank and the backup system, the lead acid battery. In addition, the coverage demanded by the system and the percentages of loading and unloading are analyzed. On the other hand, a second case is carried out in which the backup system is hydrogen storage.

Finally, a sensitivity analysis is carried out to study how the system varies with changes in the storage volume, varying around ten percent.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>9</b>
<b>Resumen</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>13</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>17</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>19</b>
<b>Notación</b>	<b>21</b>
<b>1 Introducción y objetivos</b>	<b>11</b>
1.1 <i>¿Qué es el hidrógeno?</i>	12
1.2 <i>Cadena de valor del hidrógeno</i>	12
1.3 <i>Hoja de ruta del hidrógeno</i>	13
1.4 <i>Objetivos</i>	14
<b>2 Microrredes con EE, RR y sistemas de almacenamiento</b>	<b>15</b>
2.1 <i>Introducción</i>	15
2.2 <i>Elementos esenciales</i>	16
2.2.1 <i>Sistemas de generación</i>	16
2.2.2 <i>Sistemas de Almacenamiento</i>	18
2.2.3 <i>Cargas</i>	25
2.3 <i>Desarrollo de microrredes por el mundo</i>	25
<b>3 Estudio de la microrred</b>	<b>27</b>
3.1 <i>Descripción de la microrred</i>	27
3.2 <i>Caracterización general de la Microrred</i>	28
<b>4 Implementación en trnsys</b>	<b>31</b>
4.1 <i>Types de la instalación</i>	31
4.2 <i>Diseño de la instalación</i>	33
4.3 <i>Subsistema eléctrico</i>	34
4.4 <i>Subsistema de hidrógeno</i>	35
<b>5 Análisis de resultados</b>	<b>37</b>
5.1 <i>Caso tanque hidrógeno</i>	37
5.1.1 <i>Estudio anual</i>	37
5.1.2 <i>Estudio mensual</i>	39
5.1.3 <i>Cantidad de energía cubierta</i>	39
5.1.4 <i>Porcentaje de excesos</i>	40
5.1.5 <i>Porcentaje de deficits</i>	41
5.1.6 <i>Resumen energético</i>	42
5.2 <i>Caso baterías</i>	44
5.2.1 <i>Estudio Anual</i>	44
5.2.2 <i>Estudio Mensual</i>	45
5.2.3 <i>Cantidad de energía cubierta</i>	45
5.2.4 <i>Porcentaje de excesos</i>	46
5.2.5 <i>Porcentaje de deficits</i>	47
5.2.6 <i>Resumen energético</i>	48
<b>6 Análisis de sensibilidad</b>	<b>51</b>
6.1 <i>Caso tanque hidrógeno</i>	51
6.1.1 <i>Cantidad de energía cubierta</i>	51

---

6.1.2	Porcentaje de excesos	52
6.1.3	Porcentaje de deficits	53
6.1.4	Resumen energético anual	55
6.2	<i>Caso baterías</i>	55
6.2.1	Cantidad de energía cubierta	55
6.2.2	Porcentaje de excesos	56
6.2.3	Porcentaje de deficits	58
6.2.4	Resumen energético anual	59
<b>7</b>	<b> conclusiones</b>	<b>60</b>
	<b>Referencias</b>	<b>61</b>
	<b>Anexos</b>	<b>63</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Energía Generada y Energía Demandada, 1.	39
<b>Tabla 2.</b> Resumen Energético, 1	43
<b>Tabla 3.</b> Resumen Energético, 2.	49
<b>Tabla 4.</b> Resumen energético anual, 1	55
<b>Tabla 5.</b> Resumen energético anual, 2	59
<b>Tabla 6.</b> Parámetros del archivo climáticos.	63
<b>Tabla 7.</b> Inputs del archivo climático.	63
<b>Tabla 8.</b> Outputs del archivo climático.	63
<b>Tabla 9.</b> Parámetros módulo fotovoltaico.	64
<b>Tabla 10.</b> Inputs módulo fotovoltaico.	64
<b>Tabla 11.</b> Outputs módulo fotovoltaico.	65
<b>Tabla 12.</b> Inputs perfil demanda promedio.	65
<b>Tabla 13.</b> Outputs perfil demanda.	65
<b>Tabla 14.</b> Inputs calculadora.	66
<b>Tabla 15.</b> Outputs calculadora.	66
<b>Tabla 16.</b> Parámetros controlador.	66
<b>Tabla 17.</b> Inputs controlador.	67
<b>Tabla 18.</b> Outputs controlador.	67
<b>Tabla 19.</b> Parámetros Inversor.	67
<b>Tabla 20.</b> Inputs Inversor.	68
<b>Tabla 21.</b> Outputs Inversor.	68
<b>Tabla 22.</b> Parámetros electrolizador.	68
<b>Tabla 23.</b> Inputs electrolizador	69
<b>Tabla 24.</b> Outputs electrolizador	69
<b>Tabla 25.</b> Parámetros pila de combustible	69
<b>Tabla 26.</b> Inputs pila combustible.	70
<b>Tabla 27.</b> Outputs pila combustible.	70
<b>Tabla 28.</b> Parámetros tanque.	70
<b>Tabla 29.</b> Inputs tanque.	70
<b>Tabla 30.</b> Outputs tanque.	71
<b>Tabla 31.</b> Parámetros Batería.	71
<b>Tabla 32.</b> Input Batería.	71
<b>Tabla 33.</b> Output Batería.	71
<b>Tabla 34.</b> Parámetros Controlador de carga.	72
<b>Tabla 35.</b> Inputs Controlador de carga	72

---

**Tabla 36.** Outputs Controlador de carga.

72

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Panorama energético hasta 2040 [1]	11
<b>Figura 2.</b> Ruta de la cadena de valor del H <sub>2</sub> [4]	12
<b>Figura 3.</b> Hoja de ruta del hidrógeno en la UE [5]	13
<b>Figura 4.</b> Esquema de una microrred [11]	16
<b>Figura 5.</b> Célula Fotovoltaica [12]	16
<b>Figura 6.</b> Componentes aerogenerador [13]	17
<b>Figura 7.</b> Esquema pila de combustible [15]	18
<b>Figura 8.</b> Sistemas de almacenamiento energético [17]	19
<b>Figura 9.</b> Esquema de sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno [15]	20
<b>Figura 10.</b> Sistema de almacenamiento híbrido [20]	21
<b>Figura 11.</b> Instalaciones de almacenamiento acumulativo de energía en todo el mundo [17]	22
<b>Figura 12.</b> Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo. [21]	23
<b>Figura 13.</b> Esquema de una planta/instalación CAES. [21]	23
<b>Figura 14.</b> Diagrama esquemático de un sistema de supercondensador. [21]	24
<b>Figura 15.</b> Descripción del sistema de almacenamiento de energía de volante [21]	24
<b>Figura 16.</b> Potencia instalada o anunciada para nuevos proyectos de micro redes. <i>Fuente: Trabajo Fin de Grado “Análisis de la Viabilidad de la Implantación de Micro Redes en España. Consideraciones técnicas, regulatorias y económicas. Autor: Mónica López Tafall Criado [22]</i>	25
<b>Figura 17.</b> Microrred experimental del laboratorio HyLab original. Imagen extraída de [22]	28
<b>Figura 18.</b> TRNSYS, TYPE15-6	31
<b>Figura 19.</b> TRNSYS, TYPE 14h	31
<b>Figura 20.</b> TRNSYS, TYPE 14h	32
<b>Figura 21.</b> TRNSYS, TYPE 100a	32
<b>Figura 22.</b> TRNSYS, TYPE 160a	32
<b>Figura 23.</b> TRNSYS, TYPE 164b	32
<b>Figura 24.</b> TRNSYS, TYPE170a	32
<b>Figura 25.</b> TRNSYS, TYPE 47a	32
<b>Figura 26.</b> TRNSYS, TYPE 175	33
<b>Figura 27.</b> TRNSYS, TYPE 48	33
<b>Figura 28.</b> TRNSYS, TYPE Ecu	33
<b>Figura 29.</b> TRNSYS, TYPE 25f	33

---

<b>Figura 30.</b> TRNSYS, TYPE 65c	33
<b>Figura 31.</b> Esquema de TRNSYS “Sistema de producción y almacenamiento hidrógeno con respaldo de baterías”.	33
<b>Figura 32.</b> Esquema de TRNSYS “Sistema de producción y almacenamiento hidrógeno con respaldo de baterías, 2”.	34
<b>Figura 33.</b> Generación vs Demanda, 1.	37
<b>Figura 34.</b> Patrón perfil de demanda.	38
<b>Figura 35.</b> SOC tanque H <sub>2</sub> vs SOC batería, 1.	38
<b>Figura 37.</b> Energía Almacenada vs Energía Generada, 1.	40
<b>Figura 38.</b> To Grid vs Energía Generada, 1.	41
<b>Figura 39.</b> From Grid vs Energía Generada, 1.	42
<b>Figura 41.</b> Generación vs Demanda, 2.	44
<b>Figura 42.</b> SOC tanque H <sub>2</sub> vs SOC batería, 2.	45
<b>Figura 43.</b> Energía Almacenada vs Energía Generada, 2. 1.	46
<b>Figura 44.</b> To Grid vs Energía Generada, 2.	47
<b>Figura 45.</b> From Grid vs Energía Generada, 2.	48
<b>Figura 47.</b> Energía Almacenada vs Energía Generada, 3.	51
<b>Figura 48.</b> Energía Almacenada vs Energía Generada, 4.	52
<b>Figura 49.</b> To Grid vs Energía Generada, 3.	53
<b>Figura 50.</b> To Grid vs Energía Generada, 4.	53
<b>Figura 51.</b> From Grid vs Energía Generada, 3.	54
<b>Figura 52.</b> From Grid vs Energía Generada, 4.	54
<b>Figura 54.</b> Energía Almacenada vs Energía Generada, 5.	56
<b>Figura 55.</b> Energía Almacenada vs Energía Generada, 6.	56
<b>Figura 56.</b> To Grid vs Energía Generada, 5.	57
<b>Figura 57.</b> To Grid vs Energía Generada, 6.	57
<b>Figura 58.</b> From Grid vs Energía Generada, 5.	58
<b>Figura 59.</b> From Grid vs Energía Generada, 6.	59

# Notación

---

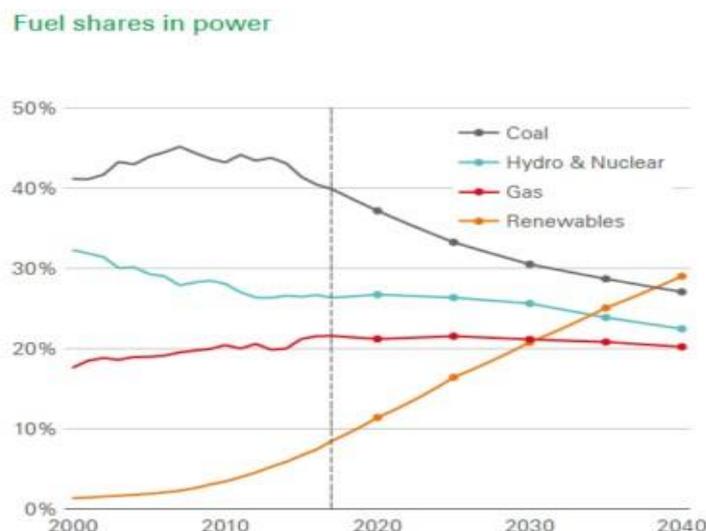
GEI	Gases de Efecto Invernadero
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
PIB	Producto Interior Bruto
UE	Unión Europea
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
H <sub>2</sub>	Dihidrógeno o Hidrógeno molecular
H <sub>2</sub> O	Agua, compuesto de hidrógeno y oxígeno
EE. RR	Energía Renovables
GW	Gigavatio
rpm	Revoluciones por minuto
MW	Megavatio
kW	Kilovatio
%	Porcentaje
EE. UU.	Estados Unidos
W	Vatios
SOC	Fracción de estado de carga
V <sub>ca</sub>	Tensión a circuito abierto en condiciones de referencia
I <sub>cc</sub>	Intensidad a circuito cerrado en condiciones de referencia
V <sub>mpp</sub>	Tensión en el máximo punto de potencia en condiciones de referencia
I <sub>mpp</sub>	Intensidad en el máximo punto de potencia en condiciones de referencia
(t)	Función del tiempo



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los escenarios venideros con un cambio climático antropogénico significativo reflejan una tendencia decreciente en la producción mundial de combustibles fósiles, la principal fuente de emisión de CO<sub>2</sub>. El agotamiento de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), el crecimiento constante de la población y el aumento del crecimiento económico mundial, inducen la búsqueda de nuevos recursos renovables para la generación de energía. Por ello, el ritmo al que la energía renovable penetra en el sistema energético global es más rápido que el de cualquier otro combustible en la historia.

**Figura 1.** Panorama energético hasta 2040 [1]



La búsqueda de fuentes de energía menos contaminantes y más eficientes nace tras la preocupación del agotamiento energético y la tendencia hacia una transición ecológica sostenible. En la Figura 1 se aprecia la tendencia creciente de la demanda de las energías renovables (curva naranja), mientras tanto la UE y el resto del mundo ha sido capaz de estabilizarse e incluso comenzar una disminución del consumo de combustibles de origen fósil en los últimos años.

El mundo se enfrenta a diversos retos, en busca de soluciones, surge el Pacto Verde Europeo que convertirá a Europa de aquí a 2050 en un continente climáticamente neutro. Se beneficiará de una transición ecológica sostenible debido a los beneficios potenciales de las energías renovables, como la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI), la desigualdad de los suministros de energía y el aumento de la independencia de los mercados de los combustibles renovables. A medida que el sistema energético se descarboniza paulatinamente hay un papel cada vez más importante para el hidrógeno.

El mundo se dirige hacia un camino insostenible: para lograr los objetivos de emisiones de carbono pactadas es probable que se requiera de grandes medidas políticas. La demora de estas medidas políticas y de los cambiantes pensamientos sociales puede agregar notablemente la magnitud del desafío.

El objetivo es simular una instalación para suministro de energía eléctrica a una vivienda usando renovables y sistemas de almacenamiento de energía (en particular la tecnología del hidrógeno). Para ello, se trasladó al Software haciendo un análisis de sensibilidad de esta microrred.

### 1.1 ¿Qué es el hidrógeno?

Es uno de los elementos más importantes de la tabla periódica. Fue descubierto en el año 1766 por el científico Henry Cavendish, quien además descubrió su oxidación en presencia de oxígeno para producir agua. En su núcleo atómico cuenta con un protón. Cuando se unen mediante un enlace covalente dos átomos de hidrógeno forman el H<sub>2</sub>. Es un gas inodoro, incoloro e insípido, pero por su contra inflamable. Además, es el elemento más numeroso, y ligero, ya que su átomo está formado por un protón y un electrón. Su masa atómica es de 1,00797 g/mol y su densidad de 0,071 g/ml.

El H<sub>2</sub>O es uno de los compuestos principales formados por el hidrógeno como también lo son gran cantidad de compuestos orgánicos y minerales.

El hidrógeno no es un elemento ofensivo para la salud humana, pero en casos muy extremos de inhalación accidental puede provocar inconsciencia e incluso la muerte.

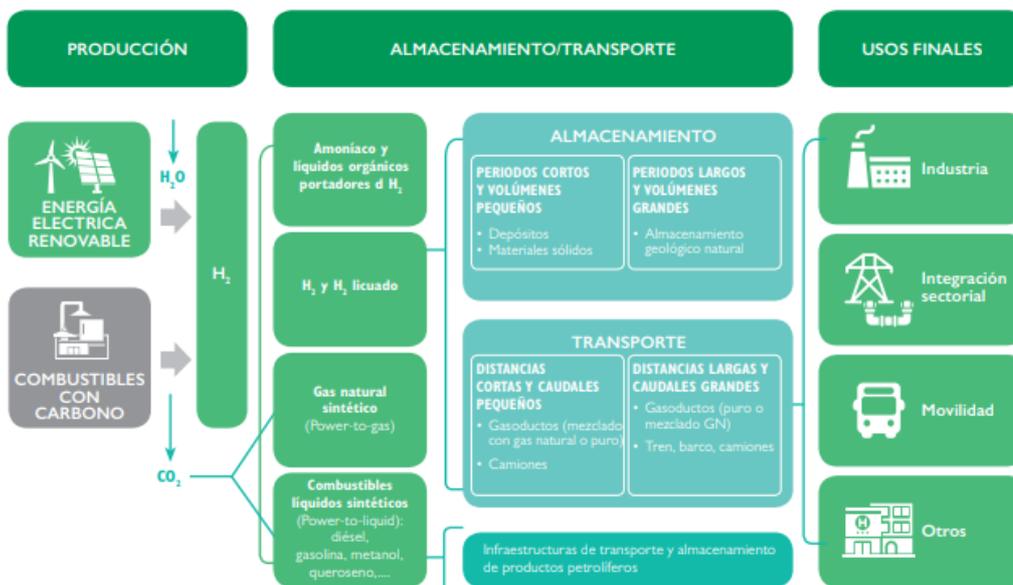
Además, en condiciones normales no se han encontrado estudios de que pueda ser un gas contaminante para la naturaleza. Se sitúa estratégicamente como uno de los recursos renovables más prometedoras del futuro, debido a ser inagotable, abundante y subproducto de la combustión es el H<sub>2</sub>O. [2] [3]

### 1.2 Cadena de valor del hidrógeno

El H<sub>2</sub> es un vector energético ya que necesita de energía para ser extraído y cuenta con la ventaja de ser capaz de almacenar energía para ser inyectada en la red cuando sea oportuno. El hidrógeno se puede clasificar en diferentes tipos en función de la materia prima necesaria y las emisiones de CO<sub>2</sub> expulsadas para su producción:

- Hidrógeno verde: producido a partir de energía renovable mediante electrólisis y utilizando como materia prima el agua.
- Hidrógeno gris: obtenido mediante proceso de reformado y utilizando como materias primas el gas natural u otros hidrocarburos ligeros.
- Hidrógeno azul: lo diferencian del hidrógeno gris las técnicas de captura, uso y almacenamiento de carbono.

Figura 2. Ruta de la cadena de valor del H<sub>2</sub> [4]



La cadena de valor del hidrógeno comprende en general tres campos: producción mediante energía renovable

o combustibles con carbono, almacenamiento en diversos estados (líquido o gas presurizado) o con portadores de hidrógeno como amoníaco o líquidos orgánicos, distribución a partir de vehículos móviles (tren, barcos o camiones) o gasoductos y consumo final en sus distintos campos de aplicación. Es necesario que cada etapa debe garantizar la seguridad, reducir los costes y garantizar el cumplimiento de los reglamentos, códigos y estándares.[4]

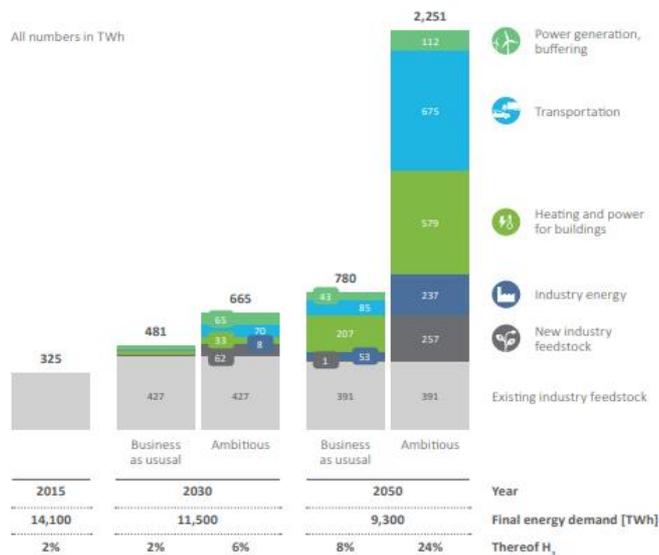
### 1.3 Hoja de ruta del hidrógeno

Estrategia Europea del Hidrogeno; se reconoce al H<sub>2</sub> como un importante elemento para apoyar el compromiso de la Unión Europea de alcanzar la neutralidad de climática en 2050. Además, es un elemento fundamental para crear innovadoras cadenas de valor industriales y obtener una robusta economía verde. El H<sub>2</sub> será clave en la industria, transporte y almacenamiento energético.

Establece tres etapas temporales:

- 1ª fase 2020-2024: instalación de al menos 6 GW de electrolizadores en la UE y la producción de hasta 1 millón de toneladas de hidrógeno renovable.
- 2ª fase 2025-2030: instalación de al menos 40 GW de electrolizadores en la UE y la producción mínima de 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable.
- 3ª fase 2030-2050: debido a ser un valioso vector energético es válido como solución a gran escala en todos los sectores difíciles de descarbonizar y, además, alcanzando gran madurez. [4]

**Figura 3.** Hoja de ruta del hidrógeno en la UE [5]



Se aprecia en la anterior figura el aumento exponencial de la demanda de hidrógeno en Europa. Actualmente, la mayor parte del hidrógeno es utilizado en refinerías, en la industria química y agroindustrial para la producción de metanol y amoníaco. También están surgiendo nuevas oportunidades para el uso del hidrógeno como materia prima. Además, se impulsa el uso de este en producción de calor mediante calderas. Los vehículos impulsados por hidrógeno ahora están disponibles en el mercado de automóviles aumentando sus cuotas de mercado rápidamente en las próximas décadas. Por otro lado, las pilas de combustibles se convertirán en la tecnología dominante en el futuro. Por último, pero no menos importante, el hidrógeno es una necesidad para poder equilibrar los desbalances del sistema eléctrico. El hidrógeno puede almacenarse y transportarse de manera económica sencilla y, por lo tanto, es muy adecuado para igualar el suministro y la demanda de electricidad en tiempo y lugar. Lograr la transición energética en la UE requerirá hidrógeno a gran escala. Sin hidrógeno, la UE probablemente perderá su objetivo de descarbonización. [5]

## 1.4 Objetivos

La finalidad del proyecto es estudiar la viabilidad de las microrredes basadas en energía renovables y tecnología de hidrógeno, controlando la gestión de los diferentes equipos almacenadores: tanques de hidrógeno y baterías. Para ello, se desglosa las diferentes partes de una microrred y se profundiza con el desarrollo de estas por el mundo. En segundo lugar, se describe la instalación del sistema de energía real y se traslada al software utilizado, es decir, se implementa el sistema en TRNSYS. En consecuencia, se realiza un análisis de los diferentes casos estudiados, es decir, caso en el que el almacenamiento de hidrógeno es prioritario y después el caso en que el exceso se inyecta en primer lugar en el sistema de baterías. Para terminar el estudio se modifica el tamaño de los sistemas almacenadores, haciendo un análisis de sensibilidad. Por último, en los anexos se detallan todos los parámetros de los diferentes TYPES utilizados.

# 2 MICRORREDES CON EE, RR Y SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

---

## 2.1 Introducción

En búsqueda de alternativas eficientes y fiables para el suministro eléctrico aparecen las microrredes. Nacen para aportar mejores condiciones al servicio eléctrico, haciéndolo más seguro y competentes, ante todo en zonas urbanas y rurales. Se puede definir cómo una red eléctrica distribuida que trabajan de forma simultánea o independiente con respecto a la red principal y puede estar compuesta por diferentes fuentes de energía. Estas unidades de menor generación necesitan gestionar el almacenamiento de energía para compensar tanto la variabilidad de generación renovable como la aleatoriedad del comportamiento de los consumidores. No obstante, esto da lugar a nuevos retos desde el punto de vista del control.

Las microrredes es un nuevo complemento de menor escala del sistema eléctrico centralizado. Estás inyectan energía a la red eléctrica de forma local ya que disponen de elementos para la generación, distribución y regulación del flujo de energía. En cuanto sus componentes, se constituye por unos elementos generadores, un sistema de almacenamiento de energía, consumidores y un punto de conexión con la red.

Lo ideal es que la energía generada sea renovable, pero, debido a la intermitencia de estas, es importante añadir sistemas de almacenamiento que respalden al sistema en momentos de necesidad energética del consumidor.

Además, puede distribuir energía a una instalación o varias en paralelo. Tiene un papel importante en momentos en los que la red eléctrica pueda fallar ya que hay consumidores como industrias que no pueden permitirse quedarse fuera de servicio debido a un corte de corriente o por condiciones meteorológicas. Por ello se combinan diferentes sistemas que puedan compensar la energía. Tiene la fundamental característica de que puede operar desconectada del sistema centralizado y funcionar por sí sola como un generador independiente. La microrred y la red se conectan en un punto de tensión similar, en caso de que exista fallo en la red eléctrica desconectamos de la red y opera de forma aislada. Además de facilitar la calidad del servicio, las microrredes apoyan al sistema para un servicio ininterrumpido. Entonces, una microrred puede operar interconectada con la red de distribución principal, a través del denominado Point of Common Coupling (PCC), o en modo isla, con generadores y cargas locales. Hay que destacar que pueden interconectarse entre ellas dando lugar a sistemas más complejos.

La microrred permite reducir costes, contar con áreas energéticamente independientes haciendo estas áreas más verdes, debido a la disminución de emisiones contaminantes, y apoyar al sistema en caso de posibles desconexiones.

En cuanto a las ventajas del uso de microrred se encuentran:

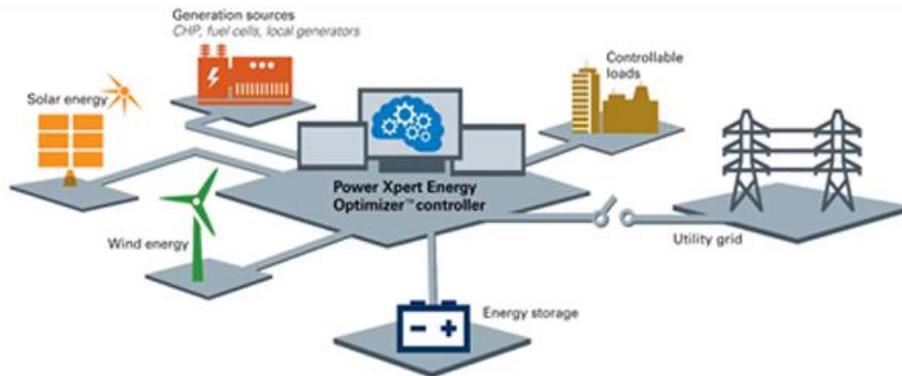
- Aumento de la eficiencia energética, debido a las menores pérdidas de redes de transporte y distribución.
- Disminuye el consumo global de energía.
- Disminución de las emisiones de GEI y las emisiones contaminantes.
- Aumento de la calidad y fiabilidad del servicio.
- Funcionar en caso de fallo de la red principal.
- Acceder a la generación de energía en caso de inclemencias meteorológicas, de forma que servicios de emergencia como hospitales e industrias puedan seguir operando.
- Mejorar la resiliencia local. Zonas donde es difícil de llevar la energía, como zonas rurales dispersas, tengan un servicio eléctrico de calidad.

- Mayor aceptación social debido a menor cantidad de líneas eléctricas. [6], [7], [8], [9], [10]

## 2.2 Elementos esenciales

Los tres grandes grupos de las microrredes son: generación, almacenamiento y consumo de energía. Se aprecia en la siguiente figura los componentes básicos de una microrred:

**Figura 4.** Esquema de una microrred [11]



Seguidamente se analiza los grupos de las microrredes haciendo hincapié en sus diferentes subgrupos.

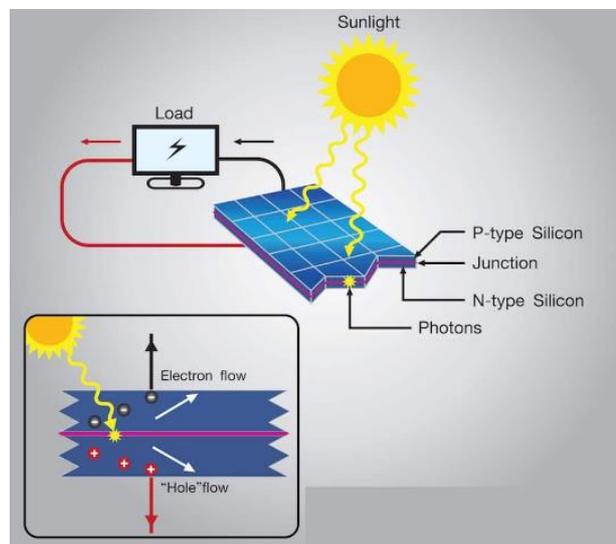
### 2.2.1 Sistemas de generación

#### Energía solar:

Aquellos dispositivos capaces de convertir la luz solar en energía eléctrica como pueden ser los paneles fotovoltaicos y la solar térmica de concentración.

Una célula fotovoltaica es un equipo capaz de producir energía eléctrica a partir de luz solar. Se fundamenta en el efecto fotoeléctrico caracterizado por la producción de una corriente eléctrica entre dos piezas de material semiconductores (silicio o germanio) diferente que están en contacto y expuestas a la luz o, en general, a una radiación electromagnética, generándose una diferencia de potencial entre la capa exterior (iluminada) y la interior.

**Figura 5.** Célula Fotovoltaica [12]



Existen dos tipos de células:

- Célula de silicio monocristalino (M-Si): único cristal de silicio con estructura muy uniforme. En este caso los átomos están alineados facilitando la conductividad.
- Célula de silicio policristalino (P-Si): están formado por muchos cristales de silicio. Poseen menor rendimiento que los monocristalino, pero es más económico. Tienen una superficie irregular y células totalmente cuadradas.
- Células de capa delgada (Thin-Film): se obtiene al depositar varias capas de material fotovoltaico sobre una base.

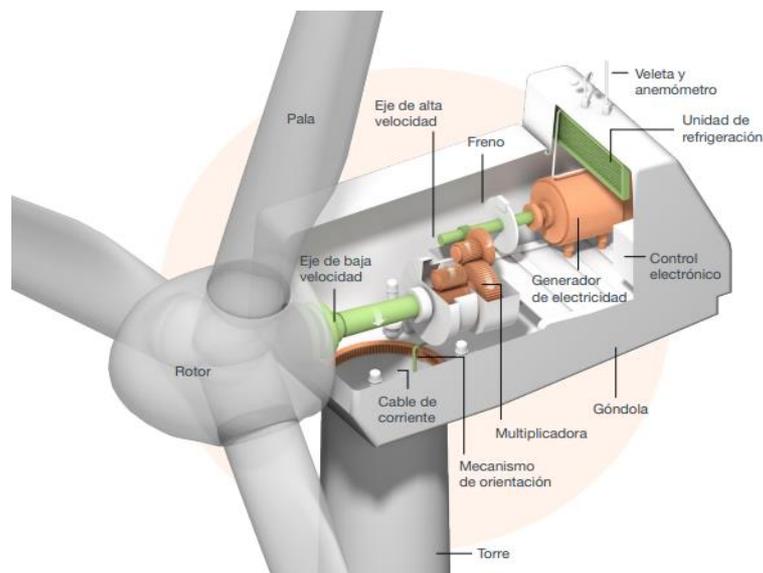
### Energía eólica:

Gracias a la fuerza del viento se obtiene la energía eléctrica a partir de la transformación de la energía cinética mediante un alternador. Los componentes más importantes para la obtención de energía eólica son el rotor, que transforma la energía cinética en energía mecánica, y el generador, que convierte la energía mecánica en eléctrica. Es una opción importante en el uso de microrredes debido a que es una energía eficiente, madura y segura, clave para la descarbonización de la economía.

Para aprovechar la energía cinética, la altura óptima debe oscilar entre 80 y 120 metros de altura, pero depende de la fuerza del viento. Por ello, los grandes parques eólicos con gran número de aerogeneradores deben implantarse en lugares donde predomine la presencia del viento. Además, necesitan orientarse en la dirección frecuente del viento para obtener el máximo de energía posible. A partir de ahí, las tres principales partes del aerogenerador:

- El rotor: se compone por un número de palas y el buje que las une, captan la fuerza del viento y la convierten en energía mecánica de rotación.
- La multiplicadora: unida al motor mediante un eje, eleva las revoluciones de giro del conjunto buje-aspas de 30 rpm a 1500 rpm.
- El generador: convierte en energía eléctrica la energía mecánica de rotación.

**Figura 6.** Componentes aerogenerador [13]



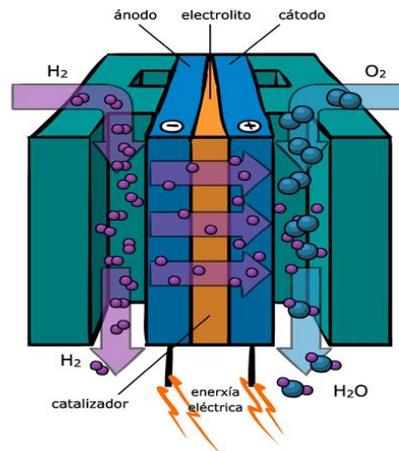
Los aerogeneradores de un parque eólico se unen por cables subterráneos que llevan la energía generada hasta la subestación transformadora. En consecuencia, se transporta hasta los consumidores finales.

Hay que destacar que su gran problema para la introducción en microrredes es el mismo que los concentradores solares, requiere gran ocupación de terreno. [14] [13]

### Pilas de combustible:

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química en electricidad y calor, se compone de dos electrodos, el ánodo y el cátodo, separados por una membrana llamada electrolito. Para producir corriente eléctrica continua se combina el oxígeno del aire con el hidrógeno. El carburante se oxida en el ánodo, liberando electrones que recorren el circuito externo hasta el cátodo. El circuito se forma con el flujo de iones en el electrolito, que además separa las dos corrientes de gases, combustible y oxidante. El calor residual generado puede emplearse también para producir más electricidad. Para suministrar el voltaje y potencia deseadas las celdas se apilan y se conectan en serie o en paralelo.

**Figura 7.** Esquema pila de combustible [15]



Estas se clasifican generalmente en función del tipo de electrolito usado. Las principales diferencias entre ellas son las temperaturas de operación, la pureza del combustible usado, los rendimientos y las aplicaciones en las que se usan. En la actualidad, existen los siguientes tipos de pila de combustible: pila de combustible de membrana de intercambio protónica (PEMFC), pila de combustible de óxido sólido (SOFC), pila de combustible alcalina (AFC), pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC), y pila de combustible de carbonato fundido (MCFC).

Se requiere un equipo inversor de energía para transformar la corriente continua a la corriente alterna necesaria para ceder energía a la red de distribución.

Las pilas de combustibles es un elemento fundamental en las microrredes ya que producen energía a través de la energía inyectada en forma de hidrógeno desde los sistemas de almacenamiento. [14] [15] [16]

### Otros:

Otros tipos de generación de energía para el uso de microrredes pueden ser los siguientes;

La biomasa se estima que sea una de las energías más importante debido a ser inacabable. Es un material orgánico procedente de las plantas y los animales. Tras su combustión la energía química en la biomasa se desprende en forma de calor, que se utiliza para producir vapor que se puede utilizar para producir electricidad o calor para industrias y hogares.

También se encuentran las microturbinas de gas, son turbinas de combustión que mediante un motor rotativo extrae energía de un flujo de gas de combustión.

Por último, la hidroeléctrica a pequeña escala y los grupos electrógenos son otros tipos de generación con la misma importancia, pero no con el mismo desarrollo e implantación en el campo de las microrredes.

Pueden ser interesantes para microrredes que respalden grandes residencias o industrias. [14]

## **2.2.2 Sistemas de Almacenamiento**

El almacenamiento es un pilar fundamental para la transición energética: permite la conversión de energía eléctrica de forma que se pueda reservar y devolver en forma de electricidad cuando se requiera. Uno de los

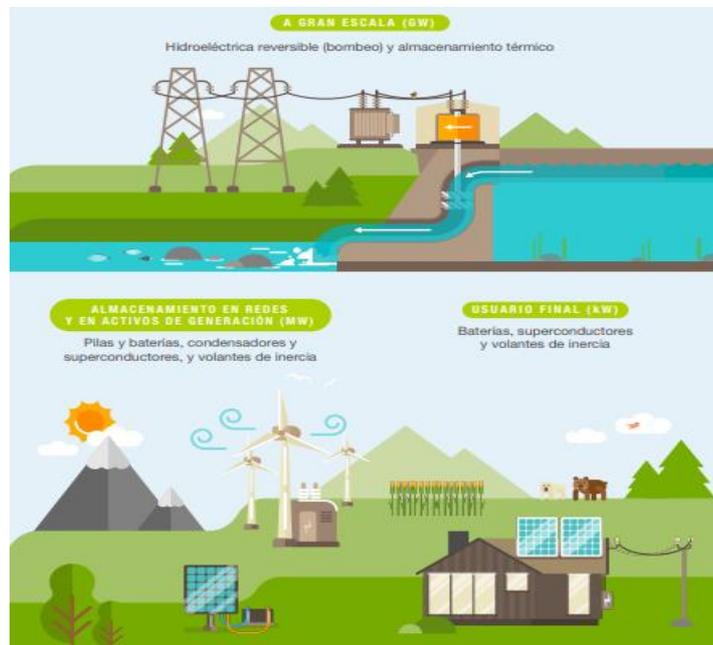
problemas en la actualidad es el almacenamiento de forma práctica, es decir, fácil y barata. Por tanto, habría que competir a niveles de desarrollo de generación, transporte y transformación de la energía eléctrica. El escaso desarrollo del almacenamiento da lugar a que la energía eléctrica deba generarse simultáneamente con la demanda, así pues, las energías renovables tienen un importante problema debido a su intermitencia.

En la actualidad el mundo energético sigue una tendencia hacia una generación a partir de fuentes renovables, como pueden ser la energía eólica y la solar. Entonces, para respaldar su intermitencia resultaría de vital importancia un mayor desarrollo de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, asegurando que la frecuencia de las redes eléctricas esté equilibrada y optimizando el consumo de energía producida.

Para el almacenamiento necesitamos transformar la energía eléctrica en, energía mecánica o química. Conforme a su capacidad, estos sistemas se agrupan en:

- Almacenamiento a gran escala, se emplea en lugares en los que se trabaja con escalas de GW
- Almacenamiento en redes y en activos de generación, se trabaja con escalas de MW
- Almacenamiento a nivel de usuario final, se emplea a nivel residencial y se trabaja con kW. [17]

**Figura 8.** Sistemas de almacenamiento energético [17]



Las tecnologías y sistemas más desarrolladas para las provisiones de energía son entre otras:

#### Almacenamiento de gas a presión:

Es la forma de almacenamiento de hidrógeno que está más avanzada y tiene mayor experiencia. El hidrógeno comprimido en forma gaseosa se puede llevar a cabo de dos formas, para pequeña escala de almacenamiento, mediante almacenamiento en tanques o recipientes (dispositivos/vessel), y para gran escala, almacenamiento geológico.

Para el almacenamiento a pequeña escala existen 4 tipos de tanques contenedores de alta presión. Los Tipo I son recipientes a presión fabricados con acero o aluminio. El H<sub>2</sub> que se utiliza como gas industrial se almacena en depósitos de tipo I, cuya presión no supera los 175 bares si es de aluminio y 200 si es de acero. Debido a su peso es inviable para automoción. Además, son los depósitos de alta presión más extendidos en la actualidad y los más baratos. Los Tipo II son recipientes a presión fabricados reforzados con un revestimiento de fibra de carbono o vidrio en la dirección del aro en la sección cilíndrica del depósito. Pueden soportar hasta 1000 bares y son viables en aplicaciones estacionarias. Se utilizan como depósitos de alta presión en hidrogeneras.

Los tanques Tipo III son recipientes a presión formados por un revestimiento (liner) metálico interno, utilizado para evitar las fugas de hidrógeno por difusión, totalmente revestidos por materiales compuestos, que soportan

los esfuerzos mecánicos. En comparación con los tipos I y II se eliminan las paredes metálicas gruesas y un mayor uso de materiales compuestos que permiten reducir el peso. Los Tipo IV, son recipientes a presión fabricados con una camisa polimérica de alta densidad, que actúa como barrera de difusión de gas, totalmente envuelta con un compuesto de fibra de carbono. Toleran presiones de hasta 700 bar. Debido a la disminución del peso y la necesidad de un uso en automoción, los recipientes de tipo III y IV están pensados para aplicaciones portátiles, necesitando presiones entre 350 y 700 bar.

Por otro lado, las cavernas de sal, los yacimientos y acuíferos de gas natural o petróleo agotados, se podrían utilizar para almacenar hidrógeno, en la actualidad se utilizan para almacenar gas natural. Estas alternativas subterráneas permiten almacenar a gran escala y a largo plazo.[18] [19]

#### Almacenamiento en hidruros metálicos:

Para el caso de almacenamiento en tanque de hidruros metálicos, es necesario encontrar hidruros con mayor capacidad gravimétrica. Para ello, los hidruros tienen que estar compuestos de elementos ligeros como elementos alcalinos o alcalinotérreos i.e. hidruros iónicos (LiH, NaH, CaH<sub>2</sub>...). De todos ellos, el más interesante y utilizado es el hidruro de magnesio (MgH<sub>2</sub>) debido a la gran cantidad de magnesio, su despreciable reactividad y su alta capacidad de acumulación de hidrógeno. Por su contra, su carácter iónico indica una entalpía de 76 kJ/mol dando lugar a reacción absorción/desorción lenta, impidiendo su uso a temperaturas razonables lo que obstaculiza su implementación. Se está investigando la disminución de la entalpía y acelerar la cinética de reacción. Actualmente, se está realizando un enorme esfuerzo para disminuir esa entalpía y acelerar la cinética de la reacción.

Además, existen otras familias como los hidruros complejos, basados en hidruros ligeros, entre los que se encuentran los borohidruros.

En definitiva, la dificultad de depositar grandes cantidades de hidrógeno de forma segura y barata aún no ha sido resuelto y constituye una de las limitaciones para la implementación de la economía del hidrógeno. Por tanto, es necesario un desembolso económico para propulsar la investigación como el desarrollo técnico y consolidar los sistemas de almacenamiento con hidruros metálicos. [20]

#### Sistema conjunto de almacenamiento de hidrógeno:

Paulatinamente, se consolida como un sistema rentable de almacenamiento de energía. El sistema está compuesto por un electrolizador, un tanque o botellas almacenadoras, compuesta por hidruros metálicos, y una pila de combustible. El equipo encargado de producir hidrógeno es el electrolizador mediante la descomposición del agua en el proceso de electrólisis. Se inyecta los excedentes de energía en el electrolizador para producir hidrogeno y transportarlo a los sistemas de almacenamiento. Por último, el equipo generador es la pila de combustible que ha sido explicada en el apartado anterior (sistemas de generación).

**Figura 9.** Esquema de sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno [15]



Centrándonos en un sistema de generación, por ejemplo, una instalación fotovoltaica, en ocasiones no se puede evacuar toda la energía eléctrica generada a la red. Es ahí donde entra en juego el almacén de energía, ya que con el excedente de energía que la red eléctrica no es capaz de absorber se alimentaría a un

electrolizador produciéndose hidrógeno que se almacenaría para ser posteriormente utilizado mediante pila de combustible para producir electricidad en momentos de déficit de la red eléctrica. Es un sistema interesante para la gestión y producción de las microrredes y el cual ha sido utilizado en el estudio del trabajo. [15], [17]

### Baterías:

Es un equipo que a través de compuestos químicos almacena energía y son capaces de generar electricidad. Existen gran variedad de tipos, por ejemplo, las pilas de plomo-ácido, de ion de litio o de níquel-cadmio. Las baterías se pueden utilizar ampliamente en diferentes aplicaciones, como la calidad de la energía, la gestión de la energía, los sistemas de transporte y la alimentación continua.

Para cumplir con los requisitos de almacenamiento de energía, la batería tiene que ser de alta densidad de energía, alta potencia, alta eficiencia de carga, buena capacidad de ciclo, larga vida y bajo costo inicial. Se muestran las ventajas de las baterías para almacenamiento de energía:

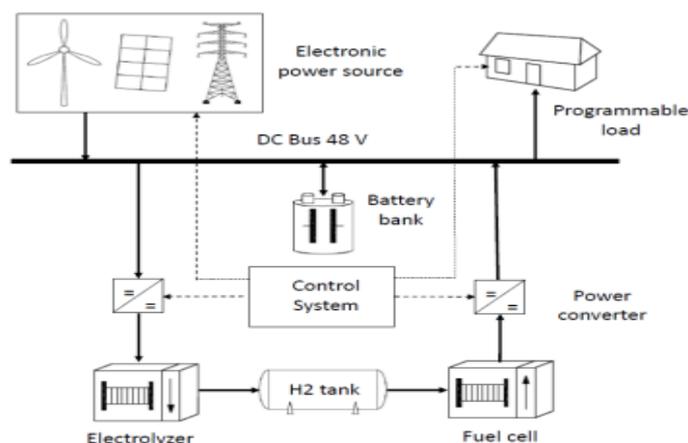
- Proporcionan un tiempo de respuesta rápido (milisegundos).
- Son silenciosas y no contaminantes, son ideales para instalaciones en zonas suburbanas, cerca de los centros de carga.
- Su facilidad de instalación y escalabilidad, gracias a la capacidad de adaptación y respuesta de un sistema con respecto al rendimiento de este.
- Gracias a la diversidad de tipos de batería hay una gran variedad de aplicaciones como por ejemplo para regulación de frecuencia, mejora de calidad de suministro o con fines económicos.

En cuanto a los problemas principales de las baterías recargables son los bajos número de ciclo de carga y descarga que soporta, lo cual limita en gran medida su vida útil dependiendo del tipo de batería instalado, la tasa de uso y las condiciones ambientales. Además, sus componentes tienen un elevado grado de contaminación, siendo extremadamente tóxicos para los seres humanos y el medio ambiente; dañando el suelo, el agua y poniendo en peligro a la vida silvestre. Las baterías de estado sólido significantes son las baterías Plomo-Ácido (Pb-Acid), las basadas en Nickel (NiCd, NiMH, NiFe, NiZn), Litio (Li-Ion) y Sodio (NaS, NaNiCl) y las de aire- metal (Me-air) y en el de las baterías de flujo caben destacar las baterías Vanadio Redox (Redox flow battery) y las baterías híbridas como las de Zinc-Bromo (ZnBr Battery). [17], [21]

### Sistema híbrido de almacenamiento de hidrógeno y batería eléctrica:

Es el caso en que el sistema de energía es híbrido, es decir, el aporte de energía en momentos de déficit está compuesto por la pila de combustible o la batería. Si entre la energía solar fotovoltaica y la pila de combustible no pueden satisfacer la demanda de los consumidores, se va a hacer uso de las baterías para poder satisfacer la demanda de los consumidores.

**Figura 10.** Sistema de almacenamiento híbrido [20]



### Baterías de litio: el futuro del almacenamiento.

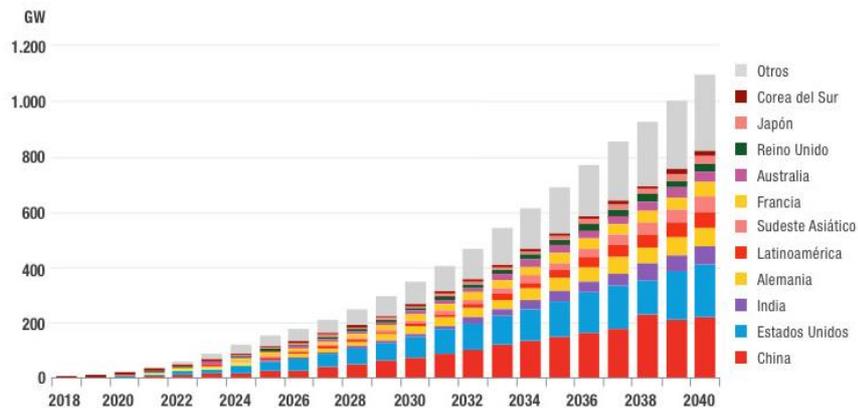
El problema de las energías renovables se solventará con las baterías de ion litio para el almacenamiento de la energía generada. Gracias a su alto potencial electroquímico puede acumular grandes cantidades de energía. Además de, su reducido peso y una elevada eficiencia, solo el coste de inversión ha sido un obstáculo para ser una principal tecnología de almacenamiento.

Esta batería (Li-Ion) se constituye por un óxido de metal de litio, como  $LiCoO_2$  y  $LiMO_2$ , y el ánodo está hecho de carbono grafito. El electrolito es frecuentemente un líquido orgánico no acuoso que contiene sales de litio disueltas, como  $LiClO_4$ . Esta tipología de baterías posee una considerable vida útil (en torno a 15 años o 6.000 ciclos), una eficiencia superior al 95% y poseen de baja tasa de autodescarga. Se considera un buen equipo para aplicaciones que requieran de respuesta rápida.

Según un reciente estudio de BloombergNEF (BNEF), el coste por kW/h de las baterías de ion de litio se reducirá la mitad para 2030, acompañado del despegue de demanda en dos mercados diferentes: almacenamiento estacionario y vehículos eléctricos.

Esto dará lugar a que las instalaciones de almacenamiento de energía a nivel mundial se multipliquen exponencialmente, desde unos modestos 9GW/17GWh implementados desde 2018 hasta los 1.095GW/2.850GWh para 2040.

**Figura 11.** Instalaciones de almacenamiento acumulativo de energía en todo el mundo [17]



Respecto a los pronósticos de BNEF, la demanda total de baterías será de 4.584 GWh para 2040, tanto en sectores de almacenamiento estacionario y transporte eléctrico. Además de favorecer la transición energética supondrá una gran oportunidad para los fabricantes de baterías y las empresas extractoras de sus componentes, como el litio, el cobalto y el níquel.

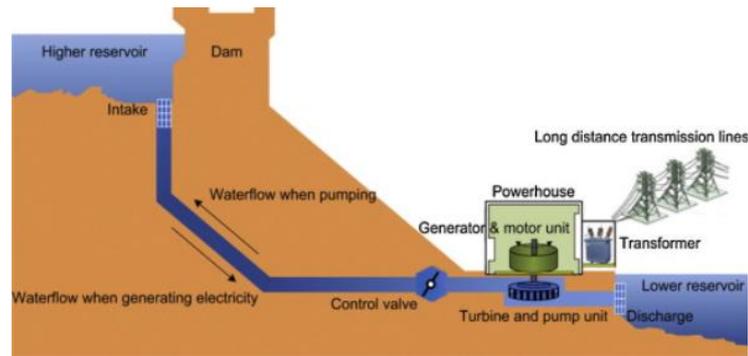
Además de los sistemas de almacenamiento de energía en tanque de hidrógenos, el uso de baterías es un elemento importante debido a su gestionabilidad en las microrredes y su facilidad de hibridación con los tanques de hidrógenos. Entonces, es interesante para nuestro estudio un mix de almacenamiento. [17], [21]

#### Bombeo hidroeléctrico:

Es el sistema de almacenamiento a gran escala más eficiente. Además, de ser una tecnología madura y rentable, equilibra el sistema eléctrico y ofrece tiempos de respuestas inmediatos para generar energía limpia. Como se muestra en la siguiente figura, una planta bombeo hidroeléctrico típica se compone de dos depósitos de agua dispuestos a diferente altura. Durante horas de exceso de energía, el agua se bombea al depósito de nivel superior; durante las horas de déficit energético, el agua se transporta al depósito de nivel inferior. En momentos de generación de energía, el agua cae hacia las turbinas que impulsan los generadores eléctricos.

La problemática de este sistema de almacenamiento es la elección del sitio, largos tiempos de construcción y una alta inversión de capital. Por, tanto no es una opción viable para las microrredes.

**Figura 12.** Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo. [21]

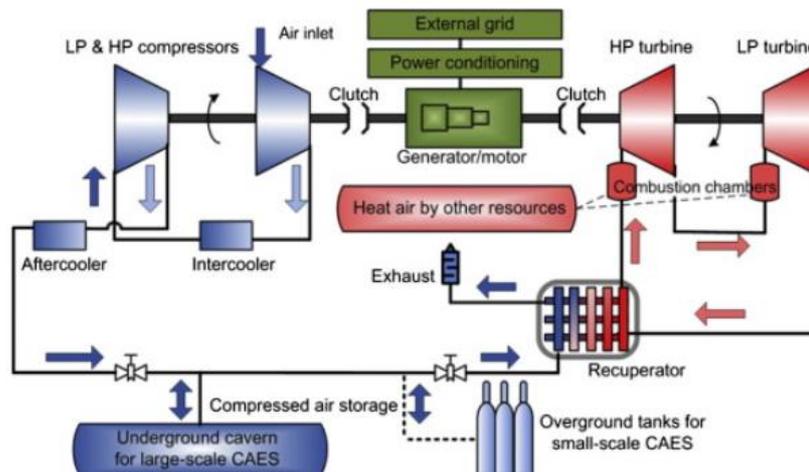


### Almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES):

Estas instalaciones cuentan con un motor reversible que, almacena el aire ambiente a elevadas presiones en cámaras subterráneas. Se puede comparar en capacidad con el sistema de almacenamiento hidroeléctrico.

Además, CAES es otro tipo de tecnología de almacenamiento que puede proporcionar una potencia de salida de más de 100 MW con una sola unidad. En la siguiente figura se muestra un esquema de una planta CAES. Trabaja de forma que en momentos de excedente inyecta la energía en una unidad de motor/generador reversible al mismo tiempo hace funcionar una cadena de compresores para inyectar aire en un recipiente de almacenamiento, que puede ser una caverna subterránea o tanques sobre el suelo. El almacenamiento de aire es a alta presión. En caso de déficit de energía, se libera el aire comprimido y es calentado a través de la combustión de combustibles fósiles o el calor recuperado del proceso de compresión. Las turbinas finalmente extraen la energía desprendida del aire comprimido. Puede aparecer un equipo de recuperación para el calor residual del escape.

**Figura 13.** Esquema de una planta/instalación CAES. [21]



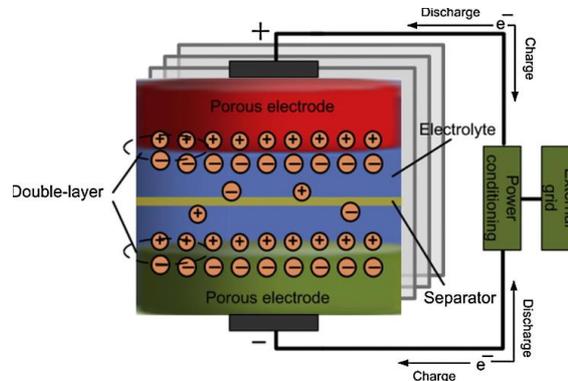
La tecnología CAES puede proporcionar una velocidad de respuesta moderada y un buen rendimiento de carga parcial y es una buena opción para el almacenamiento de pequeña y gran escala. Los usos prácticos de las plantas CAES a gran escala abarcan aplicaciones como el cambio de carga, reducción de picos y control de frecuencia y voltaje de la red. CAES puede trabajar con la intermitencia de la energía renovable. Para implementar plantas a gran escala habría que identificar las ubicaciones geográficas que determinarían el principal costo de inversión de la planta. Por su contra, tampoco es recomendable para el uso en microrredes, si fuera buena opción en caso de sistemas de pequeña escala que ocupen poco espacio. [21]

### Supercondensador:

Es un dispositivo que contiene dos electrodos conductores, un electrolito y un separador de membrana porosa

como se muestra en la siguiente figura. Son capaces de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas en las superficies entre el electrolito y los dos electrodos conductores. Estos pueden ser cargados y descargados de forma inmediata, siendo claves para responder necesidades de energía o breves interrupciones de suministro.

**Figura 14.** Diagrama esquemático de un sistema de supercondensador. [21]

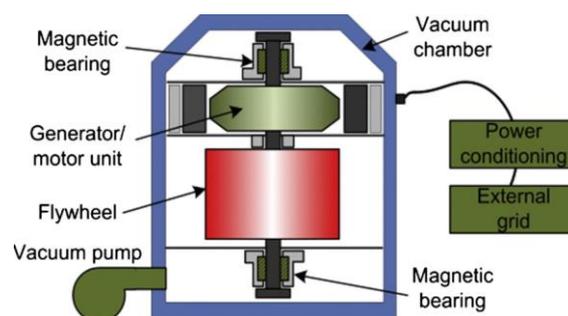


Las densidades de potencia y energía de los supercondensadores se encuentran entre las de las baterías recargables y los condensadores tradicionales. Las características más importantes de los supercondensadores son sus largos tiempos de ciclo, y su alta eficiencia de ciclo, aproximadamente 84–97 %. Podrían ser una opción viable en equipos de baja ocupación de espacio y rendimientos elevados. [21]

#### Volantes de inercia:

Este sistema de almacenamiento se basa en un disco metálico que comienza a girar cuando se ejerce un par motor y, en consecuencia, se intenta frenar el volante mediante un par resistente conservando la energía eléctrica en forma de energía cinética. Sus componentes principales son: un volante, un grupo de cojinetes, un motor/generador eléctrico reversible, una unidad electrónica de potencia y una cámara de vacío. Estos sistemas utilizan electricidad para acelerar o desacelerar el volante, es decir, la energía almacenada se transfiere hacia o desde el volante a través de un motor/generador integrado. La cantidad de energía almacenada depende de la velocidad de rotación del volante y su inercia.

**Figura 15.** Descripción del sistema de almacenamiento de energía de volante [21]



Se puede clasificar en dos grupos:

- Baja velocidad: utiliza acero como material del volante. Se utilizan para aplicaciones de potencia media/alta a corto plazo.
- Alta velocidad: utiliza materiales compuestos avanzados para el volante, como la fibra de carbono. Se añaden rodamientos magnéticos sin contacto para mejorar la eficiencia del sistema. [21]

### 2.2.3 Cargas

Las microrredes son sistemas que tienen que abastecer a la demanda de unas determinadas cargas eléctricas o térmicas, de carácter estático (constantes en el tiempo) o dinámico (dependen y cambian con el tiempo, con unidades de frecuencia variable). Con independencia de lo anterior, lo que determina realmente la gestión que se puede hacer de las cargas es si estas son controlables o fijas:

- Cargas controlables: son aquellas cargas que pueden ser conectadas o desconectadas cuando se requiera, permitiendo desplazar su operación en función de los requisitos energéticos, capacidad de generación o como respuesta a incentivos económicos.
- Cargas fijas: son cargas críticas, aquellas que deben satisfacerse en todo momento [22]

## 2.3 Desarrollo de microrredes por el mundo

Las microrredes nacen como una opción descentralizada capaz de coordinar y gestionar los sistemas de energía renovable, tal que disminuye la capacidad de coordinación y gestión de los sistemas centralizados. Aunque, para implementar de forma completa se necesita un desembolso mayor de inversión en el desarrollo y la investigación.

Seguidamente, se reparará a nivel mundial el desarrollo en el campo de las microrredes. Bloomberg New Energy Finance, ha identificado aproximadamente 300 proyectos de microrredes operativos a nivel global y, además, más de 200 anunciados, o en construcción. Desde 2010, se ha mantenido un crecimiento constante de las microrredes, a excepción de dos interrupciones en 2012 y 2014.

**Figura 16.** Potencia instalada o anunciada para nuevos proyectos de micro redes. *Fuente: Trabajo Fin de Grado “Análisis de la Viabilidad de la Implantación de Micro Redes en España. Consideraciones técnicas, regulatorias y económicas. Autor: Mónica López Tafall Criado [22]*



En caso de que se completen los casi 200 proyectos anunciados se prevé un aumento de potencia instalada (7544 MW) de 5096,293 MW y supondría un aumento del 67,5%, alcanzándose los 51 GW de potencia instalada a nivel mundial. Hoy en día, la mayor parte de los proyectos operativos se localizan en las potencias mundiales como EE. UU. y China y Japón, seguidos de los instalados en países con un nivel de desarrollo inferior a los que actualmente dominan en el mundo; las Azores, Islas Fiji, Jamaica, Seychelles, Vanuatu, Maldivas, etc. y en las islas del Caribe y Latino América.

De entre todos ellos, un 60% de las microrredes se emplean a conceder servicio a instalaciones comerciales o industriales o su funcionamiento está pensado para trabajar de forma autónoma. Por otro lado, el otro 40% se divide entre proyectos de pequeña escala, proyectos residenciales o militares, entre otros. Los países con mayor desarrollo en microrredes son China y Japón que se colocan a la cabeza en potencia instalada en todas las modalidades con conexión a red. [22] [23]



# 3 ESTUDIO DE LA MICRORRED

---

En este capítulo se describe la instalación del sistema de energía real que se ha usado de apoyo para realizar las simulaciones del estudio. El estudio consiste en diseñar un sistema de producción y almacenamiento de hidrogeno verde respaldado con un sistema de almacenamiento de batería de plomo-ácido. A partir del caso base se realizará un análisis de sensibilidad. En primer lugar, se contextualiza y describe la disposición del sistema. En segundo lugar, se muestran las características de los principales equipos que lo componen.

## 3.1 Descripción de la microrred

Para el diseño de la microrred se han tomado algunas características de la Microrred experimental del laboratorio, la cual fue creada por el Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla, con la necesidad de estudiar la integración de los sistemas de energía renovables y sistemas de almacenamiento que utilizan el hidrogeno como vector energético. Además, la Microrred del Hylab es una instalación con carácter experimental concebida con una estructura modular que le otorga un alto grado de flexibilidad con relación a las topologías de sistemas y componentes que pueden ser investigados.

Se recogen los datos necesarios para caracterizar cada elemento de la instalación, que será desarrollado en el siguiente apartado. Por otro lado, para implementar el perfil de demanda de la instalación se recogen los datos de consumo de una semana y se repetirá el patrón durante un año.

Los componentes más importantes de las instalaciones son:

- Módulos fotovoltaicos para la generación eléctrica y reducir el consumo de electricidad de la red.
- Pilas de combustible, generan energía eléctrica a partir de hidrógeno.
- Electrolizador, este equipo produce la electrolisis del agua, proceso por el cual se obtiene el hidrógeno a partir de agua y una corriente eléctrica.
- Tanques de hidruros metálicos, almacenan el hidrogeno producido por el electrolizador. Actúan, en momentos de déficit energético, es decir, la demanda es mayor que la generación del campo fotovoltaico.
- Stack de baterías de plomo-ácido, en un segundo estudio, se utiliza otro sistema de almacenamiento de respaldo de energía, como lo son las baterías, principalmente utilizadas para compensar los desajustes instantáneos de potencia.

La planta experimental Hylab, fue diseñada con el objetivo de investigar nuevas tipologías y funcionamientos de los subsistemas que lo constituye. Además, facilitar el ensayo de distintas configuraciones, modos de operación y rangos de potencia.

En la siguiente foto se puede apreciar los diferentes componentes del sistema como pueden ser el tanque de hidruros metálicos, el electrolizador, la pila de combustible, el stack de batería...

**Figura 17.** Microrred experimental del laboratorio HyLab original. Imagen extraída de [22]



### 3.2 Caracterización general de la Microrred

El conjunto de fuentes de generación, demanda y sistemas de almacenamiento forman la Microrred experimental, tal y como se muestra en la figura anterior. Con el objetivo de parametrizar cada Type en el software TRNSYS, se caracterizan cada uno de los elementos principales que forman parte del sistema:

- Un stack de baterías de plomo-ácido de 48 V con capacidad de 1100 Ah de almacenamiento.
- Un stack de baterías de litio con capacidad para almacenar 19.2 kWh.
- Un conjunto de paneles fotovoltaicos con una generación pico 4 kWp y seguidor de máxima potencia.
- Un electrolizador con un consumo de 2.5 kW de potencia para una capacidad para producir aproximadamente 0.5 Nm<sup>3</sup>/h (500 NI/h) de hidrógeno.
- Una pila de hidrógeno con capacidad para generar 1.2 kW
- Dos tanques de almacenamiento de hidrogeno constituidos por hidruros metálicos con una capacidad para almacenar hasta 7 m3 a 5 bares

El sistema es completado por los siguientes equipos auxiliares, los cuales no son implementados en el software, es conveniente saber todos sus elementos auxiliares que deberían de tener en cuenta en un estudio más exhaustivo.

- Un circuito hidráulico provisto de un termo eléctrico y de conexión a la red local de suministro, configurable tanto para refrigerar como para calentar los tanques de hidruros metálicos.
- Un circuito de hidrógeno, compuesto por la unión la red del electrolizador, los tanques de hidruro y la alimentación de la pila de combustible.
- Un convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno.

- Un convertidor DC/DC monodireccional asociado al campo de paneles fotovoltaicos.
- Un convertidor DC/DC bidireccional asociado al stack de baterías de litio

Caracterizar la herramienta de simulación a través de los equipos del laboratorio HyLab facilitará la comprobación de los resultados que ofrecerá la herramienta. Por tanto, en la siguiente sección se desarrollará el traslado de estos equipos al software utilizado, mediante la interconexión de Types.



# 4 IMPLEMENTACIÓN EN TRNSYS

TRNSYS es un software de carácter comercial desarrollado en la Universidad de Wisconsin (EE. UU.). TRNSYS es un programa de simulación utilizado en gran parte para simular el comportamiento de los sistemas transitorios. Si bien la mayor parte de simulaciones se centran en estudios de energías renovables y de sistemas solares pasivos, así como el diseño solar activo. Además, se puede modelar otros sistemas dinámicos, como por ejemplo el flujo de tráfico o los procesos biológicos.

Este software se constituye de dos partes. Por una parte, el núcleo del motor de cálculo, que lee y procesa el archivo de entrada, resuelve de forma iterativa el sistema, resuelve la convergencia y, finalmente grafica las variables del sistema. Además, ofrece otras utilidades como determinar las propiedades termofísicas, invertir matrices, realizar regresiones lineales e interpolar archivos de datos externos. Por otra parte, una extensa biblioteca de componentes, compuesta por aproximadamente 150 modelos que van desde compresores a edificios multizona, placas fotovoltaicas a electrolizadores, procesadores de datos meteorológicos a procesadores de gráficas temporales y equipos básicos de sistemas de producción de hidrogeno. Los modelos de los componentes son programados en Fortran, por tanto, el usuario puede modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería.

Investigadores y profesionales llevan usando TRNSYS durante 35 años gracias a la flexibilidad de adopción de sus componentes a las necesidades cambiantes de la comunidad de simulación energética.

En este estudio se utiliza la versión 17.02.0005 del software. Este último año se lanzó la última actualización del programa, apareciendo la versión 18. [23]

## 4.1 Types de la instalación

Para el estudio del sistema, se crea un nuevo proyecto. Mediante la concatenación de TYPEs (placas fotovoltaicas, demanda, calculadora de balances, electrolizador, pila de combustible, etc.) y la interconexión de estos, se generará un sistema para el análisis de estudio. Los TYPEs se pueden ver como cajas negras que requieren de una serie de parámetros y variables de entradas para generar unas variables de salida. Se construirá un “diagrama de flujograma” que representa las iteraciones (potencias, energías, temperaturas, señales de control, etc.) que aparecen en el sistema. Para representar un estudio anual se deberá definir todos los parámetros de los componentes del sistema, así como las variables de entrada y salida.

Seguidamente, se describe cada uno de los componentes utilizados en TRNSYS para la simulación:

TYPE 15: este fichero lee los datos meteorológicos que se aporta por entrada (temperatura de bulbo seco, radiación total horizontal, radiación difusa por superficie, ángulo de incidencia por superficie, etc.)

**Figura 18.** TRNSYS, TYPE15-6



TYPE 14H: se genera el perfil demanda en función del tiempo con el que se trabajará durante el estudio. A partir de un conjunto de puntos de datos discretos que indican el valor de la función en varios momentos a lo largo de un ciclo.

**Figura 19.** TRNSYS, TYPE 14h



TYPE 94a: Este componente modela el rendimiento eléctrico de una matriz fotovoltaica. Muestra valores de potencia generada, voltaje e intensidad de salida.

**Figura 20.** TRNSYS, TYPE 14h



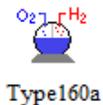
TYPE 100a: controla los excesos de energía y aporta una señal de consigna de potencia al electrolizador. Si el electrolizador está encendido, la potencia de consigna del electrolizador es igual al máximo entre el exceso de potencia de las fuentes de energía renovable a la mini red y la potencia de inactividad. Si el electrolizador está apagado, la potencia de referencia del electrolizador es igual a la potencia de inactividad o potencia en reposo.

**Figura 21.** TRNSYS, TYPE 100a



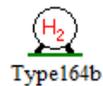
TYPE 160a: es un modelo matemático para un electrolizador de agua alcalina de alta presión. A partir de unos valores de intensidad aporta los valores de caudal de hidrogeno producido.

**Figura 22.** TRNSYS, TYPE 160a



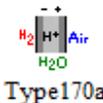
TYPE 164b: es un modelo de almacenamiento de gas comprimido. Este fichero ofrece los valores de importación y exportación de hidrogeno.

**Figura 23.** TRNSYS, TYPE 164b



TYPE 170a: a partir una serie de entradas como el déficit de energía y la potencia de la celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) muestra los valores de hidrogeno consumido.

**Figura 24.** TRNSYS, TYPE170a



TYPE 47a: este modelo de batería de almacenamiento de plomo-ácido funciona junto con una matriz de celdas solares y componentes de acondicionamiento de energía. Especifica cómo varía el estado de carga de la batería con el tiempo, dada la tasa de carga o descarga.

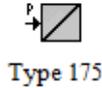
**Figura 25.** TRNSYS, TYPE 47a



TYPE 175: es un modelo matemático para una unidad de acondicionamiento de energía. El modelo se basa en la eficiencia empírica curvas para convertidores eléctricos (DC/DC) o inversores (DC/AC o AC/DC). Aporta

los valores de intensidad, a la cual trabajara el electrolizador, introduciendo unos excedentes y voltaje del electrolizador.

**Figura 26.** TRNSYS, TYPE 175



TYPE 48: si la batería está completamente cargada o solo necesita una carga gradual, el exceso de energía se descarga o no se recolecta apagando partes de la matriz. El inversor convierte la energía de CC en CA y la envía a la carga y/o la retroalimenta a la red pública.

**Figura 27.** TRNSYS, TYPE 48



TYPE Equa: es un fichero que puede realizar diferentes cálculos matemáticos (balances de energía, funciones lógicas, conversión de unidades, etc.)

**Figura 28.** TRNSYS, TYPE Ecua



TYPE 25f: El componente de la impresora se utiliza para generar (o imprimir) variables del sistema seleccionadas en intervalos de tiempo específicos.

**Figura 29.** TRNSYS, TYPE 25f



TYPE 65c: El componente de gráficos en línea se utiliza para mostrar las variables del sistema seleccionadas mientras la simulación avanza. Este componente es muy recomendable y ampliamente utilizado, ya que proporciona valiosa información variable y permite a los usuarios ver de inmediato si el sistema no está funcionando como se desea.

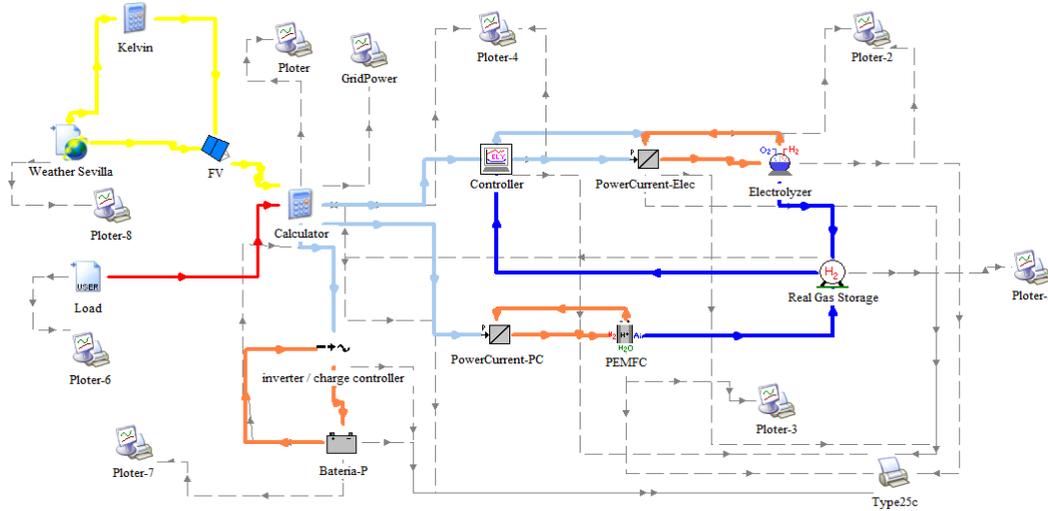
**Figura 30.** TRNSYS, TYPE 65c



## 4.2 Diseño de la instalación

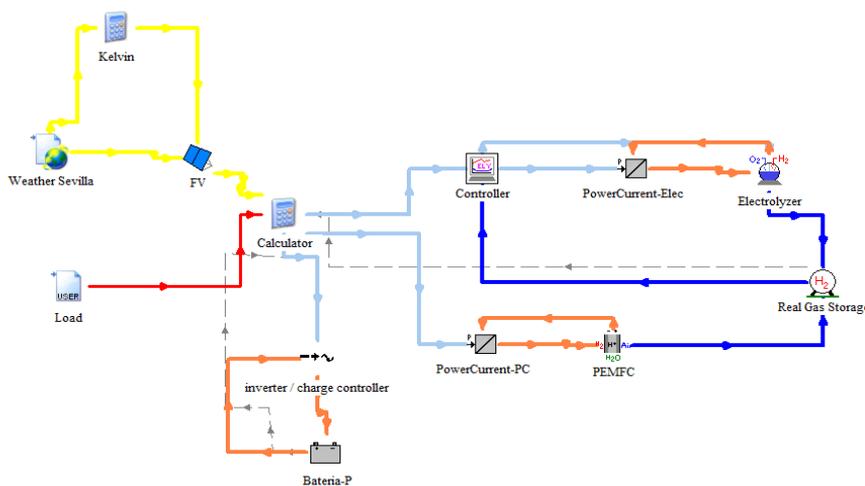
En este apartado se muestra y explica el esquema del proyecto utilizado para la realización de las simulaciones pertinentes y la evaluación del estudio. En este trabajo se ha implementado un modelo en TRNSYS, el correspondiente al caso de estudio “Sistema de producción y almacenamiento de hidrógeno con respaldo de baterías.”.

**Figura 31.** Esquema de TRNSYS “Sistema de producción y almacenamiento hidrógeno con respaldo de baterías”.



Para un estudio más claro y sencillo se van a obviar los siguientes Types: Type65c y Type25f. Anteriormente, se explicó la funcionalidad de cada uno de ellos y sirven para poder analizar los datos de salida. Como el objetivo es explicar la funcionalidad nuestra instalación, se ha quitado para no sobrecargar la imagen.

**Figura 32.** Esquema de TRNSYS “Sistema de producción y almacenamiento hidrógeno con respaldo de baterías, 2”.



### 4.3 Subsistema eléctrico

El circuito eléctrico consta de los siguientes equipos:

#### Instalación fotovoltaica:

Se introducen los datos técnicos ( $V_{ca}$ ,  $I_{cc}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ...) aportados por el fabricante utilizando el Type 94a. El Type de archivo climático, que proporciona la siguiente información: radiaciones directa, difusa y global, temperatura ambiente y ángulo de incidencia de la radiación directa (Type 15-6), se conecta a la instalación fotovoltaica.

El Type de la instalación de paneles (Type 94a), aporta la variable generación, se conecta al balance.

#### Perfil demanda:

Se utiliza el perfil demanda generado en el laboratorio. Para ello, se recogen datos de 168 horas, es decir, el perfil de demanda de una semana y se repite el patrón generado durante todo el estudio. Entonces, ya tendremos la variable demanda anual.

#### Balance:

Se incluye una calculadora que obtiene para cada paso de tiempo el balance entre la electricidad demandada (Demanda), y la electricidad generada por el campo fotovoltaico (Generación). La demanda eléctrica se indica a través de un Type 9.

Se calcula el déficit y exceso para cada paso del tiempo. Además, se envía el exceso al controlador en caso de que la fracción del estado de carga (SOC) del tanque de hidrógeno sea menor a 0.8, en caso de superar este valor, se cargaría la batería. Por otro lado, la pila de combustible se encarga del déficit mientras la SOC sea mayor a 0.2, en caso contrario, será la batería la encargada de sostener el sistema.

#### Controlador:

Este Type interfiere directamente en el electrolizador dando una señal ON cuando necesite producir una cierta cantidad de hidrógeno (Type 100a). A este llega una señal del tanque de hidrógeno para tener en cuenta la cantidad de hidrogeno almacenado, es decir, su estado de carga.

#### Bucle:

Debido a que los equipos generadores de hidrógeno y energía trabajan con las variables de intensidad. Se genera un bucle en la pila de combustible y el electrolizador. Teniendo los valores de excedentes y déficit (W), y los valores de tensión a la que trabajan se calcula los valores de intensidad. Esta será una de las entradas para cada equipo mencionado.

#### Batería:

Este equipo es necesario para respaldar al tanque de hidrogeno. En caso de que la presión del tanque sea inferior al mínimo establecido es cuando la batería aporta energía en el sistema. Además, se recargará cuando el tanque supere un máximo establecido.

#### Controlador de carga (Auxiliar de batería):

Si la batería está completamente cargada o solo necesita una carga gradual, el exceso de energía se descarga o no se recolecta apagando partes de la matriz. El inversor convierte la energía de CC en CA y la envía a la carga.

## **4.4 Subsistema de hidrógeno**

Este subsistema es el responsable de satisfacer los déficits del sistema.

#### Electrolizador:

Se decide utilizar el Type 160a, hay que introducir el número de células en serie, área del electrodo, voltaje mínimo, etc. Este produce una cantidad de hidrogeno en función de los excedentes del sistema. La variable intensidad que proviene del inversor y la señal de control ponen en marcha el funcionamiento del equipo. Es un componente crucial para llenar el tanque de hidrógeno. Además, aporta información sobre potencia y voltaje de trabajo, eficiencia global, producción de hidrogeno y oxígeno...

#### Pilas de combustible:

El Type 170a muestra el comportamiento de una pila de combustible PEM, con aire en el cátodo (OXMODE = 1), para la cual el usuario tiene que proporcionar la temperatura del stack (TMODE = 1) y con cálculos simplificados de  $R_t$  y  $C_t$  (RTCTMODE = 1). A este Type hay que introducir el número de stacks, el número de celdas del stack, el área de la PEMFC y el área de la celda, entre otros. El dato más importante es la cantidad de hidrógeno consumido, aunque, aporta información sobre la potencia de la pila de combustible, el voltaje y la intensidad, el caudal de agua para refrigeración y el calor generado, entre otros.

Tanque de hidrogeno:

Debido a que la generación y la demanda están desfasadas en el tiempo es necesario incluir un sistema de almacenamiento cuyo objetivo principal es aumentar la gestionabilidad. Se ha elegido el Type164b para el almacenamiento de hidrógeno. Este aporta los datos de hidrógeno producido y consumido haciendo un balance en el bidón. Además, aporta información sobre el estado de carga con la presión interior.

# 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de este apartado es comparar dos sistemas iguales, pero con la diferencia del control de excedentes. En primer lugar, se estudia el caso de tanque de hidrógeno, es decir, los excedentes se inyectan en el tanque y después en el sistema de baterías. Posteriormente, se estudia el caso de sistema de baterías como almacenamiento primario. En los diferentes subapartados, se hace un estudio anual y un estudio mensual para ambos casos.

## 5.1 Caso tanque hidrógeno

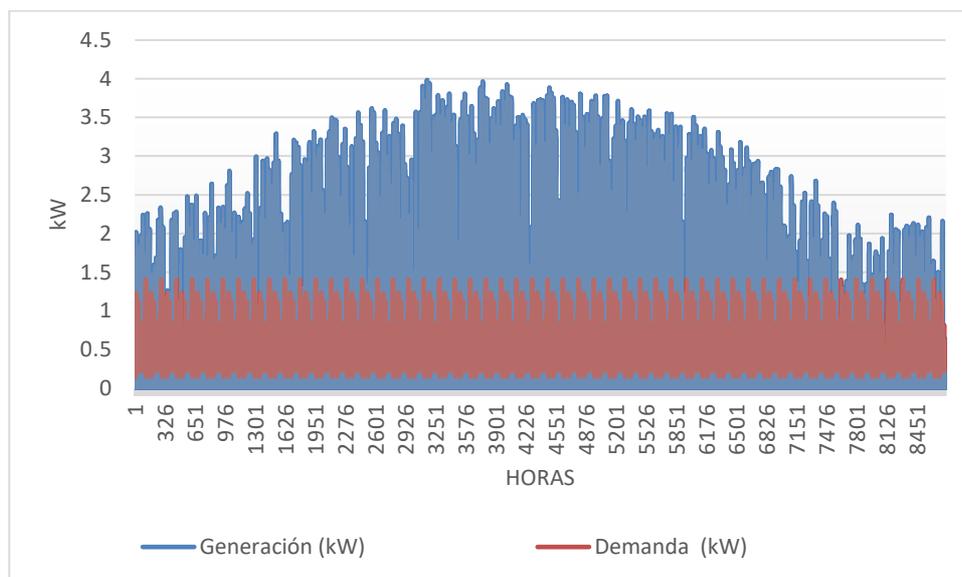
En este punto se hace un análisis detallado de los resultados obtenidos para el caso base. Para ello, se tiene en cuenta las gráficas generadas a partir del programa Microsoft Excel, haciendo hincapié para el estudio en las siguientes variables: generación y demanda, SOC del tanque H<sub>2</sub> y SOC de la batería de plomo ácido. Además, se muestra la energía cubierta por el sistema, el porcentaje de excesos y déficits del sistema, es decir, la energía que vertemos o compramos a la red.

En primer lugar, se estudiará el caso base, donde el sistema primario es el tanque de hidrógeno. Es decir, la prioridad de almacenamiento es el depósito de hidrógeno y el respaldo de energía es la batería.

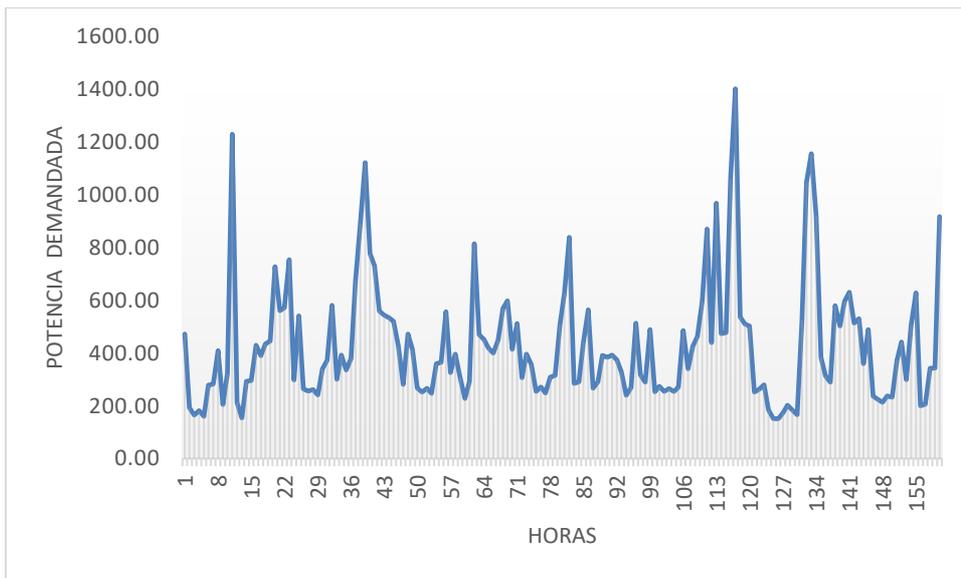
### 5.1.1 Estudio anual

Se observa que la siguiente figura tiene forma de Campana de Gauss debido a que los meses de verano la radiación es más directa y por tanto la potencia producida por el conjunto de matrices se aproxima a picos de generación, entorno 4 kWp. Por su contra, los meses de invierno la potencia instantánea no llega a los dos tercios de potencia pico de la instalación. Por otro lado, se observa que el perfil de demanda tiene un patrón definido constante en todo el periodo de tiempo estudiado, siendo el consumo máximo un tercio de la generación pico. Se representa en segundo lugar el patrón de perfil de demanda, el cual, se repite cada 161 horas.

**Figura 33.** Generación vs Demanda, 1.

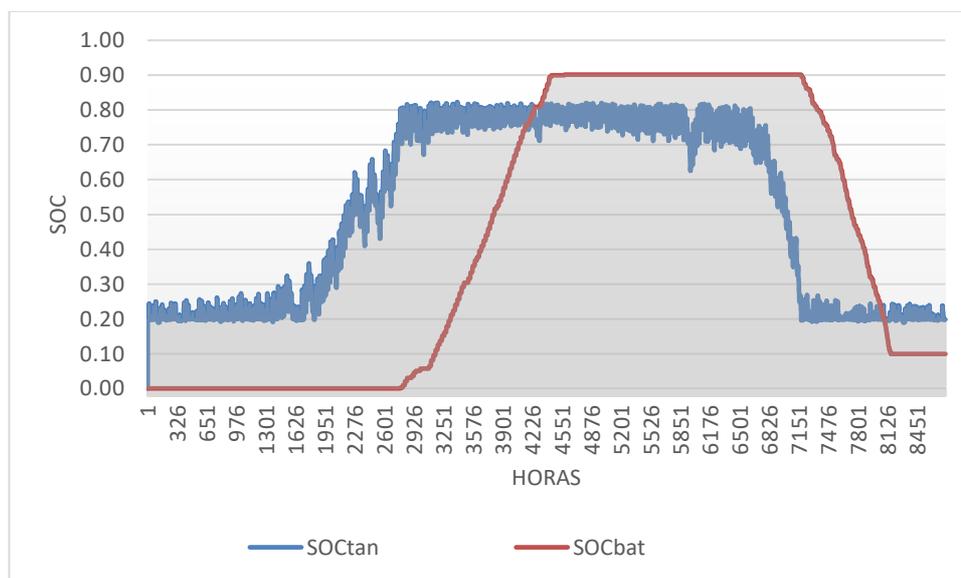


**Figura 34.** Patrón perfil de demanda.



Por otro lado, se puede visualizar el estado de carga de los dos equipos almacenadores del sistema. Por un lado, el tanque que almacena el hidrógeno producido por el electrolizador y, por otro lado, la batería que almacena la energía cuando el sistema primario supera el límite impuesto, se indica más adelante. Es intuitivo que el tanque de hidrógeno comienza con un almacenamiento inicial. Además, se recarga paulatinamente en los meses de invierno y primavera. Incluso, hay descensos y aumentos constantes debido a la climatología cambiantes. Hasta que, en el quinto mes, mayo, el tanque se llena llegando al valor límite impuesto de SOC, 0.8. Es ahí cuando la batería comienza a almacenar energía, esta tarda aproximadamente tres meses en almacenar toda la energía posible. Durante este tiempo de carga de batería no toda la energía es absorbida por esta, ya que el tanque de hidrogeno consume y absorbe hidrogeno continuamente. Además, se impone una SOC a la batería, 0.9. Finalmente, la llegada del invierno hace que los déficits sean mayoritarios y disminuye la SOC del tanque de hidrógeno, hasta SOC 0.2. Una vez llegado a tal punto, la batería gestiona los déficits descargándose hasta SOC 0.1.

**Figura 35.** SOC tanque H<sub>2</sub> vs SOC batería, 1.



### 5.1.2 Estudio mensual

Además, para mejorar la visualización de los flujos de energía se realiza la siguiente tabla que proporcionará la energía acumulada a final de cada mes para la energía generada y energía consumida o demandada por el perfil.

**Tabla 1.** Energía Generada y Energía Demandada, 1.

	Energía Generada (MWh)	Energía Demandada (MWh)
Enero	0.3063	0.3243
Febrero	0.6649	0.6182
Marzo	1.2332	0.9445
Abril	1.8619	1.2611
Mayo	2.6557	1.5861
Junio	3.4819	1.9031
Julio	4.3697	2.2280
Agosto	5.1336	2.5537
Septiembre	5.7519	2.8695
Octubre	6.2144	3.1949
Noviembre	6.5060	3.5128
Diciembre	6.7661	3.8377

Se pueden sacar conclusiones de la anterior tabla. Por ejemplo, se visualiza con facilidad la mayor generación de energía en época verano, ya que los aumentos de energía son mayores. Por otro lado, se puede observar como el consumo de energía es constante durante todo el año.

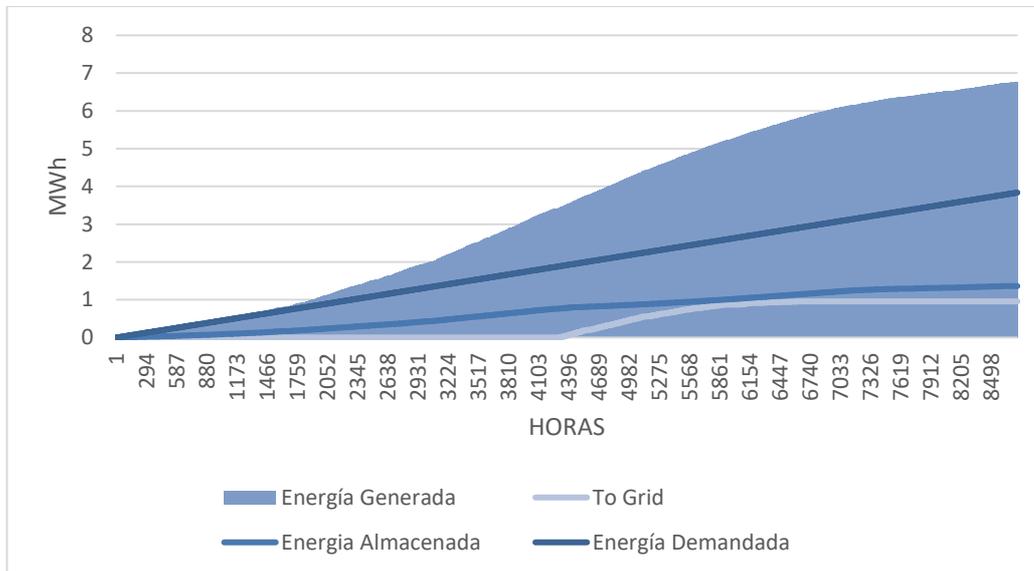
### 5.1.3 Cantidad de energía cubierta

En tercer lugar, se hace un estudio de la energía que es cubierta por el sistema. Para ello, hemos calculado la integral de la potencia instantánea dando como resultado el valor de energía. Entonces, la gráfica representa el sumatorio de energía durante todo el año. El valor total de la energía cubierta y generada será el valor máximo de la gráfica, estará ubicado en el extremo derecho de la tabla. Obtenemos un valor de energía total del orden de megavatio hora al final del año. La energía cubierta por el sistema será la misma que la energía almacenada.

- Energía almacenada total: 1365364.10 Wh  $\approx$  1,4 MWh

- Energía generada total: 6766075.39 Wh  $\approx$  6,8 MWh

**Figura 36.** Energía Almacenada vs Energía Generada, 1.



Una parte de la energía generada será utilizada para abastecer a los consumidores, es decir, alimentar al perfil demanda. Por otro lado, el exceso de energía será utilizada para suministrar energía a los equipos almacenadores. Y en caso de que sobrepasen el límite impuesto de almacenamiento se verterá la energía a la red. También, hay que tener en cuenta que los sistemas generadores de hidrogeno y energía dan lugar a pérdidas de energía debido a contener un rendimiento menor del cien por cien.

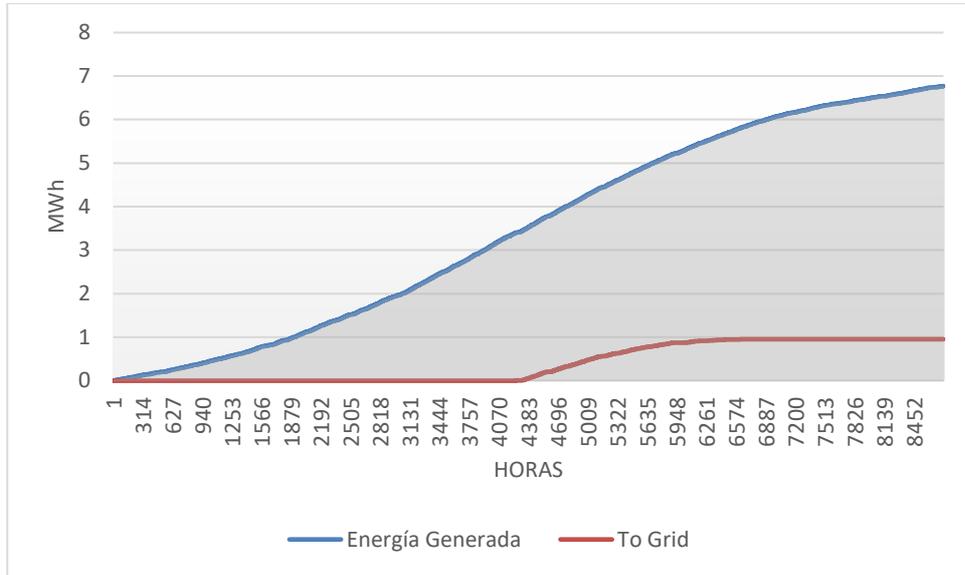
### 5.1.4 Porcentaje de excesos

Por otro lado, se hace un estudio del porcentaje de excesos del sistema. Es decir, toda la energía que se vierte a la red eléctrica principal debido a que los dos sistemas almacenadores superen el límite impuesto. Por tanto, se representa las dos curvas, la energía generada por el panel fotovoltaico durante todo el año y la energía que no es almacenada por ninguno de los dos equipos, llamada “To Grid”. Además, se ha hecho el mismo calculo que en la anterior gráfica y de nuevo la energía total es del orden de megavatio.

- Energía “To Grid” total: 955413.91 Wh
  - Energía generada total: 6766075.39 Wh
- } % Excesos = 14,1 %

Por tanto, un 14% de la energía generada por el sistema es vertida a la red. Estos excesos se podrían aprovechar mediante sistemas almacenadores con mayor volumen de carga o trabajar en paralelo con mayor cantidad de equipos almacenadores.

**Figura 37.** To Grid vs Energía Generada, 1.



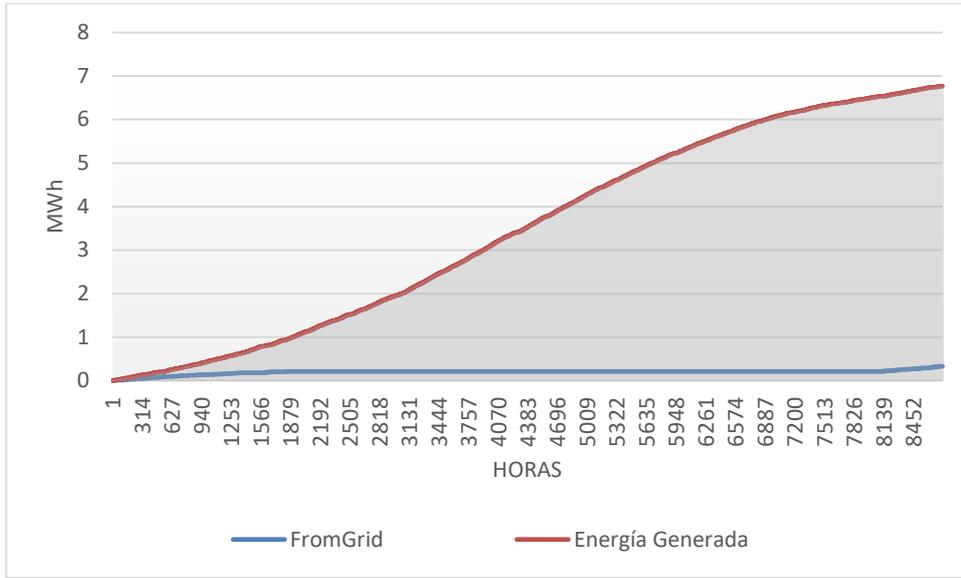
### 5.1.5 Porcentaje de deficits

Por último, se hace un estudio del porcentaje de déficits del sistema. Es decir, toda la energía que se compra a la red eléctrica principal debido a que los dos sistemas almacenadores no son capaces de cubrir la demanda. Por tanto, se representa las dos curvas, la energía generada por el panel fotovoltaico durante todo el año y la energía que no es almacenada por ninguno de los dos equipos, llamada “From Grid”. Se ha realizado de nuevo el mismo calculo que en el anterior apartado siendo el valor máximo del orden de megavatio.

- Energía “From Grid” total: 332028.42Wh
  - Energía generada total: 6766075.39 Wh
- } % Deficits = 4.9%

Por tanto, el sistema es capaz de gestionar en gran medida la energía de forma independiente. Uno de los beneficios de las microrredes es el funcionamiento en modo isla, es decir, la conexión a la red cuando sea necesario. Con esto se gana gran capacidad de gestión y abastecer a la demanda en todo momento. Además, autoabastecerse y no pagar precios desorbitados por energía.

**Figura 38.** From Grid vs Energía Generada, 1.



### 5.1.6 Resumen energético

Por último, se hace un resumen del caso estudiado para visualizar los flujos de energía. Para ello, se ha realizado la siguiente tabla que muestra los valores energéticos de los siguientes parámetros: la energía producida por la matriz fotovoltaica, la energía cubierta por el sistema de almacenamiento, la energía a la red o “To grid”, es la energía que fluye hacia la red debido a que los equipos almacenadores están llenos y, por último, energía de la red o “From grid”, la energía que se compra de la red ya que no tenemos energía en los equipos almacenadores ni produciendo en el momento.

Se pueden sacar conclusiones de la siguiente tabla, por ejemplo, para que la energía se vierta a la red tienen que llenarse los equipos almacenadores y no es hasta junio cuando empieza a venderse energía. Por otro lado, la energía desde la red no se ve modificada en los meses intermedios del año debido a que hay mayor incidencia de rayos solares y, por tanto, generación de energía.

**Tabla 2.** Resumen Energético, 1

	Energía Generada (MWh)	Energía Cubierta (MWh)	Energía a red, “To grid” (MWh)	Energía de red, “From grid”, (MWh)
Enero	0.3063	0.0584	0	0.1131
Febrero	0.6649	0.1332	0	0.1834
Marzo	1.2332	0.2584	0	0.2112
Abril	1.8619	0.3987	0	0.2112
Mayo	2.6557	0.5870	0	0.2112
Junio	3.4819	0.7753	0.0279	0.2112
Julio	4.3697	0.8753	0.5300	0.2112
Agosto	5.1336	0.9902	0.8405	0.2112
Septiembre	5.7519	1.1266	0.9444	0.2112
Octubre	6.2144	1.2633	0.9554	0.2112
Noviembre	6.5060	1.3175	0.9554	0.2112
Diciembre	6.7661	1.3654	0.95540	0.3315

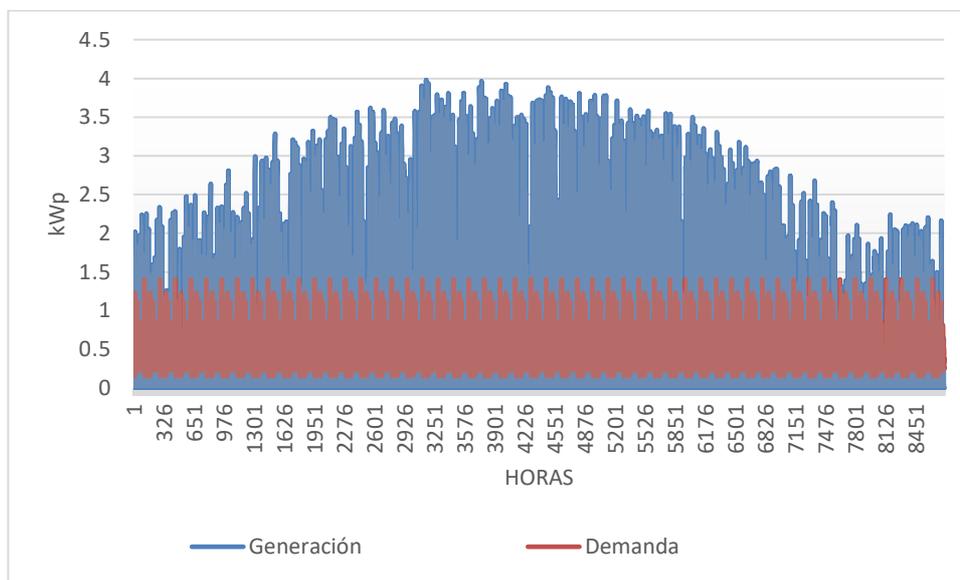
## 5.2 Caso baterías

En este segundo apartado, se hace una modificación en el sistema de control con la intención de analizar cómo responde la instalación, para ello cambiamos el control de los excedentes. En este caso el sistema primario de almacenamiento es la batería, como se dispone en la realidad. Además, se hará una comparativa con el caso anterior.

### 5.2.1 Estudio Anual

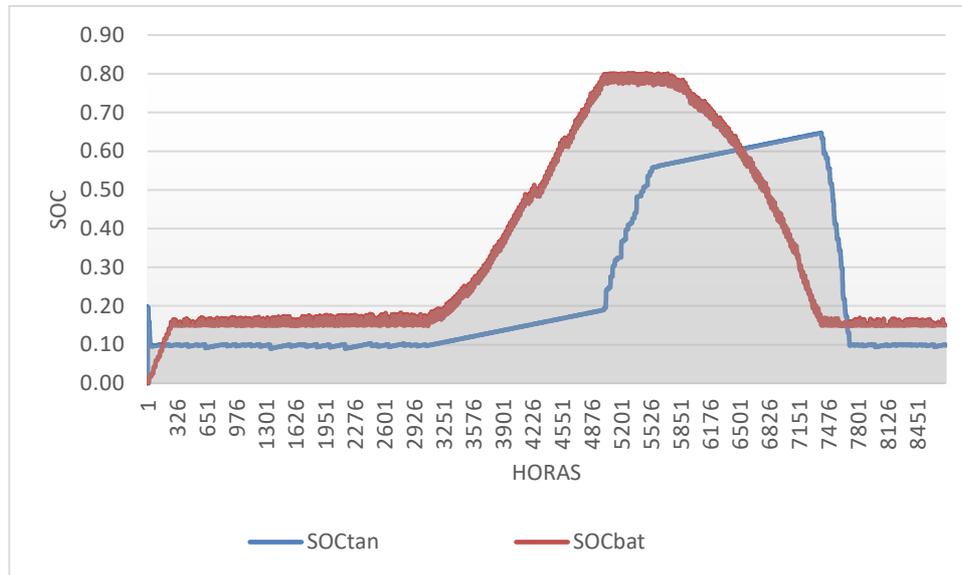
La generación y demanda no se han visto modificadas. Por tanto, las gráficas se asemejan a la del anterior apartado. La potencia pico de generación y demanda, sigue siendo 4 kWp y 1.5 kWp, respectivamente.

**Figura 39.** Generación vs Demanda, 2.



Por otro lado, se puede visualizar el estado de carga de los dos equipos almacenadores del sistema. Por un lado, la batería que almacena la energía en primera instancia y, por otro lado, el tanque que almacena el hidrógeno producido por el electrolizador cuando el sistema primario supera el límite impuesto. Es intuitivo que el tanque de hidrógeno comienza con un almacenamiento inicial que decae hasta el límite impuesto. Es ahí cuando la batería comienza a gestionar los excesos y déficit del sistema. Durante los meses de primavera es la batería el equipo que carga y descarga la energía. Hasta el comienzo del verano y el aumento de excesos de energía la batería no llega a cargarse por completo. Es ahí cuando el tanque de hidrógeno empieza a almacenar energía en forma de hidrógeno, llegando a un estado de carga de 0.65. Finalmente, en meses de otoño la batería comienza a gestionar todos los déficits de energía hasta el límite impuesto, SOC 0.15. Por último, cuando la batería llega al mínimo impuesto, es el tanque quien gestiona todos los déficits del sistema hasta llegar al límite impuesto, SOC 0.1.

**Figura 40.** SOC tanque H<sub>2</sub> vs SOC batería, 2.



### 5.2.2 Estudio Mensual

En este apartado se repite los mismos resultados, ya que no se cambia ningún parámetro de la matriz fotovoltaica así que la energía generada es la misma. Por otra parte, no se cambia el patrón del perfil de demanda.

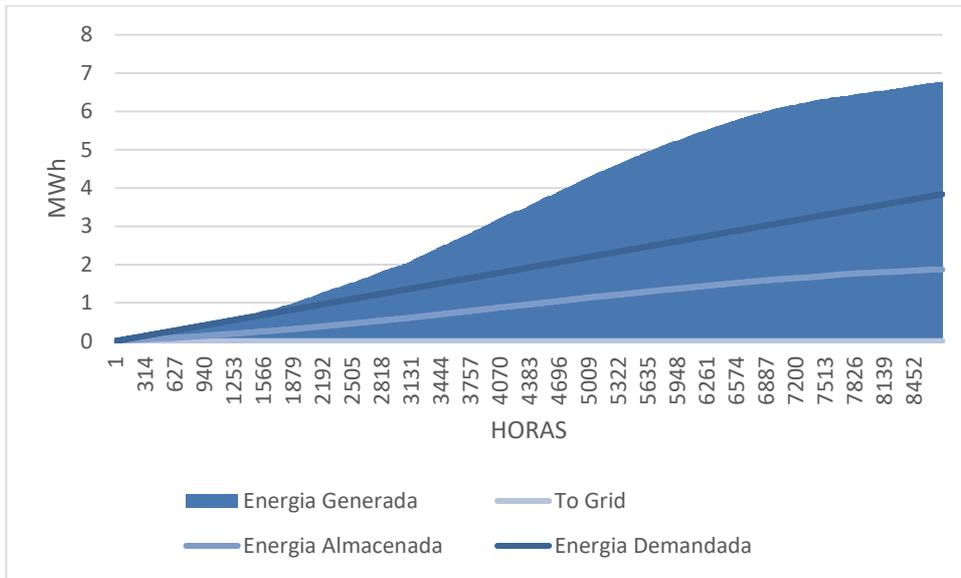
### 5.2.3 Cantidad de energía cubierta

En segundo lugar, se hace un estudio de la energía cubierta por el sistema. Para ello, hemos calculado la integral de la potencia instantánea dando como resultado el valor de energía. Entonces, la gráfica representa el sumatorio de energía durante todo el año. El valor total de la energía cubierta, o almacenada, y generada será el valor máximo de la gráfica. Obtenemos un valor de energía total del orden de megavatio hora al final del año.

Se observa que en este caso la energía cubierta es mayor que en el caso anterior. Esto es debido a la mayor gestionabilidad de la batería frente al sistema de almacenamiento de tanque de hidrógeno. Además, para producir hidrógeno necesitamos pasar por un electrolizador que produzca el combustible energético y después producir la energía mediante una pila de combustible, es decir, tiene que pasar por diferentes equipos con distinto rendimiento perdiendo por tanto cantidad de energía generada. Además, la eficiencia del sistema de batería es mayor por lo que trabaja mejor con ciclos continuos de carga y descarga.

- Energía almacenada total: 1871189.32 Wh  $\approx$  1.87 MWh
- Energía generada total: 6766075.39 Wh  $\approx$  6.77 MWh

**Figura 41.** Energía Almacenada vs Energía Generada, 2. 1.



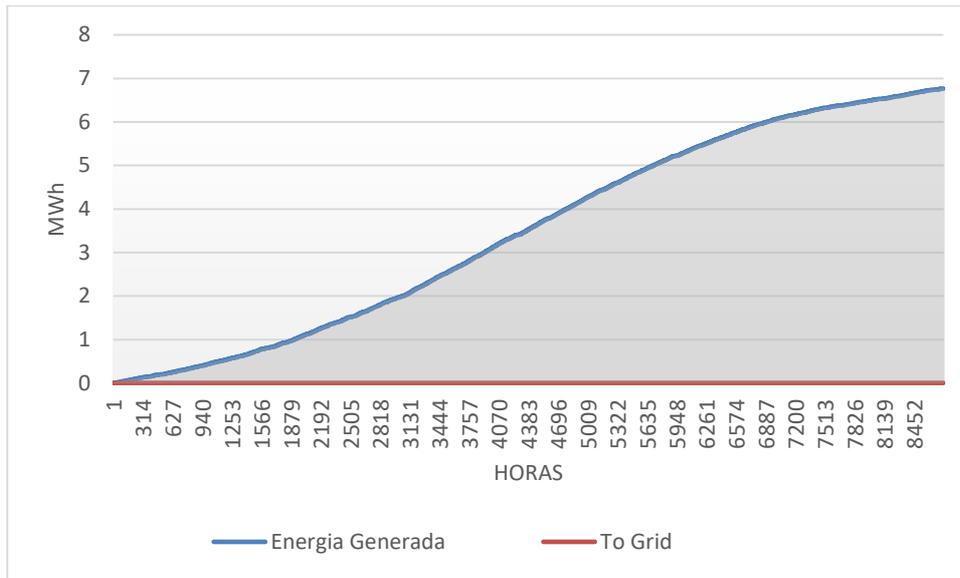
**5.2.4 Porcentaje de excesos**

Por otro lado, se hace un estudio del porcentaje de excesos del sistema. Es decir, toda la energía que se vierte a la red eléctrica principal debido a que los dos sistemas almacenadores superen el límite impuesto. Por tanto, se representa las dos curvas, la energía generada por el panel fotovoltaico durante todo el año y la energía que no es almacenada por ninguno de los dos equipos, llamada “To Grid”. De nuevo, se ha hecho el mismo calculo que en la anterior gráfica dando el valor máximo es la energía total durante todo el año. De nuevo el orden de la energía es del orden de megavatio.

- Energía “To Grid” total: 0 Wh
  - Energía generada total: 6766075.39 Wh
- } % Excesos = 0 %

Como se muestra en la gráfica y en el porcentaje anterior, no se vierte energía a la red debido a que no llegan a al límite de almacenamiento. Esto es debido a que la batería gestiona de mejor forma la energía. Los rápidos ciclos de carga y descarga de la batería hace que aproveche favorablemente la energía, de ahí a que en la realidad se use este sistema de control para el almacenamiento.

**Figura 42.** To Grid vs Energía Generada, 2.



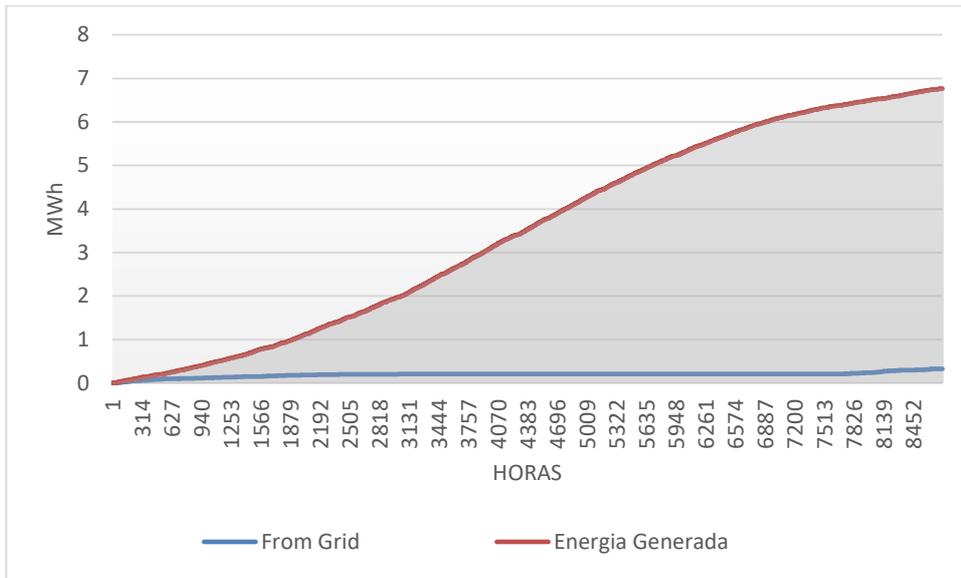
### 5.2.5 Porcentaje de deficits

Por último, se hace un estudio del porcentaje de déficits del sistema. Es decir, toda la energía que se compra a la red eléctrica principal debido a que los dos sistemas almacenadores no son capaces de cubrir la demanda. Por tanto, se representa las dos curvas, la energía generada por el panel fotovoltaico durante todo el año y la energía que no es almacenada por ninguno de los dos equipos, llamada “From Grid”. Se ha realizado de nuevo el mismo calculo que en el anterior apartado dando el valor máximo de energía total del año. De nuevo el orden de la energía es del orden de megavatio.

- Energía “From Grid” total: 327387.23Wh
  - Energía generada total: 6766075.39 Wh
- } % Deficits = 4.8%

En este caso se aprecia como ha minorada una decima el porcentaje de energía comprada al sistema eléctrico. Por tanto, el sistema es capaz de gestionar en mejor medida la energía almacenada. Asi que hay un rango de mejoría para gestionar los excedentes de energía y abastecer a la demanda en todo momento. Entonces, sería óptimo disminuir la compra de energía y asi disminuir los costes.

**Figura 43.** From Grid vs Energía Generada, 2.



### 5.2.6 Resumen energético

Por último, se hace un resumen del caso estudiado para visualizar los flujos de energía. Para ello, se ha realizado la siguiente tabla que muestra los valores energéticos de los siguientes parámetros. La energía producida por la matriz fotovoltaica, energía cubierta por el sistema de almacenamiento, energía que se vierte a la red o "To grid" y energía que proviene de la red o "From grid".

Se pueden sacar conclusiones de la siguiente tabla. En primer lugar, se observa que aumenta la energía cubierta, esto es una ventaja del sistema ya que gestiona de mejor forma los excesos de energía. Se debe a la mejor gestión de los excesos del sistema de baterías. Además, la energía que se vierte a la red no se ve modificada durante toda la simulación. Por otro lado, la energía que proviene de la red no varía considerablemente respecto el caso anterior, esto es debido a que el sistema de almacenamiento no es lo suficientemente eficiente o voluminoso para cubrir todos los deficits del sistema. No obstante, hay una menor compra de energía respecto al apartado anterior.

**Tabla 3.** Resumen Energético, 2.

	Energía Generada (MWh)	Energía cubierta (MWh)	Energía a red, “To grid” (MWh)	Energía de red, “From grid”, (MWh)
Enero	0.3063	0.1035	0	0.1066
Febrero	0.6649	0.2214	0	0.1494
Marzo	1.2332	0.3772	0	0.19019
Abril	1.8619	0.5521	0	0.20471
Mayo	2.6557	0.7484	0	0.20738
Junio	3.4819	0.9459	0	0.20738
Julio	4.3697	1.1567	0	0.20738
Agosto	5.1336	1.3412	0	0.20738
Septiembre	5.7519	1.5114	0	0.20738
Octubre	6.2144	1.6561	0	0.20738
Noviembre	6.5060	1.7874	0	0.24039
Diciembre	6.7661	1.8710	0	0.32739



# 6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En este apartado, se hace una modificación en el volumen del sistema de almacenamiento con la intención de analizar cómo responde la instalación, para ello se modifica un 20 % el volumen del tanque de hidrógeno. Entonces, se realiza un estudio de la variación de la cantidad de energía cubierta, porcentaje de excesos y porcentaje de déficits.

## 6.1 Caso tanque hidrógeno

En este primer caso, se estudia el aumento y decremento de volumen del tanque para el caso en el que el tanque de hidrógeno es prioritario. Por tanto, al minorar y mayorar este volumen obtenemos:

- Tanque de hidruros metálico de 8.4m<sup>3</sup>
- Tanque de hidruros metálico de 5.6m<sup>3</sup>

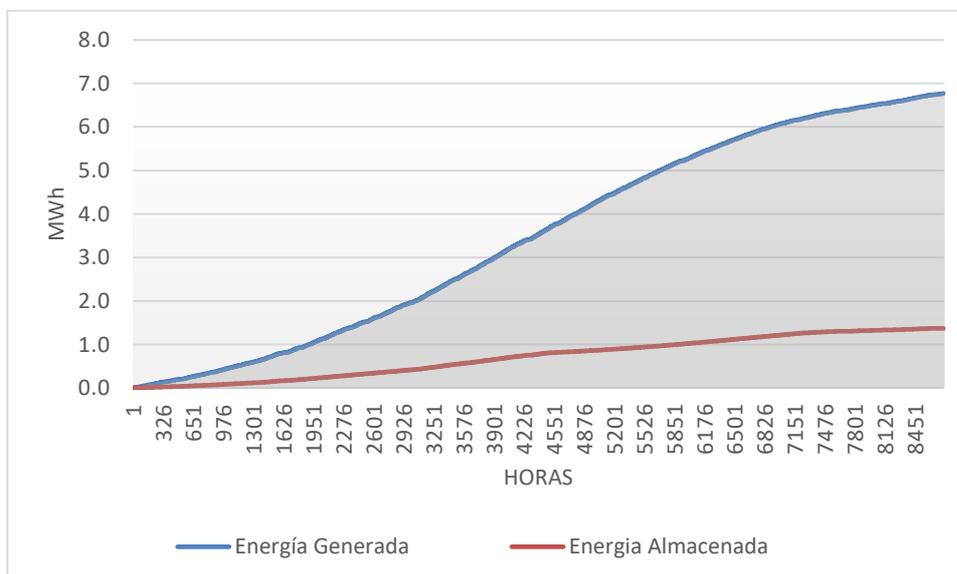
### 6.1.1 Cantidad de energía cubierta

En principio, la energía cubierta por el sistema de almacenamiento, o la energía que se ha almacenado en el sistema aumenta cuando aumenta el volumen del tanque. Esta conclusión se podría haber hecho antes de simular el proyecto debido a que a mayor almacenamiento de hidrógeno mayor energía almacenada en el sistema y, por tanto, mayor energía para abastecer al sistema. La diferencia de ambos casos es del orden de 12 kWh, es decir, habría que estudiar si es viable económicamente invertir en un tanque mayor para almacenar mayor cantidad de energía. Se muestra los valores de energía máxima cubierta anual y las gráficas para los diferentes casos.

- Energía Cubierta total, 1: 1.3733 MWh
- Energía Cubierta total, 2: 1.3617 MWh

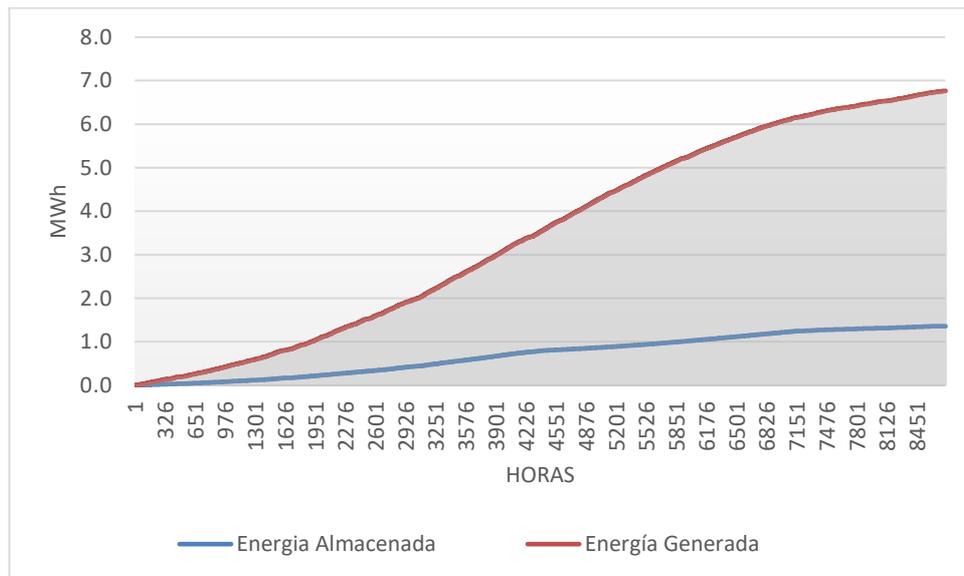
Tanque de hidruros metálico de 8.4m<sup>3</sup>:

**Figura 44.** Energía Almacenada vs Energía Generada, 3.



Tanque de hidruros metálico de 5.6m3:

**Figura 45.** Energía Almacenada vs Energía Generada, 4.



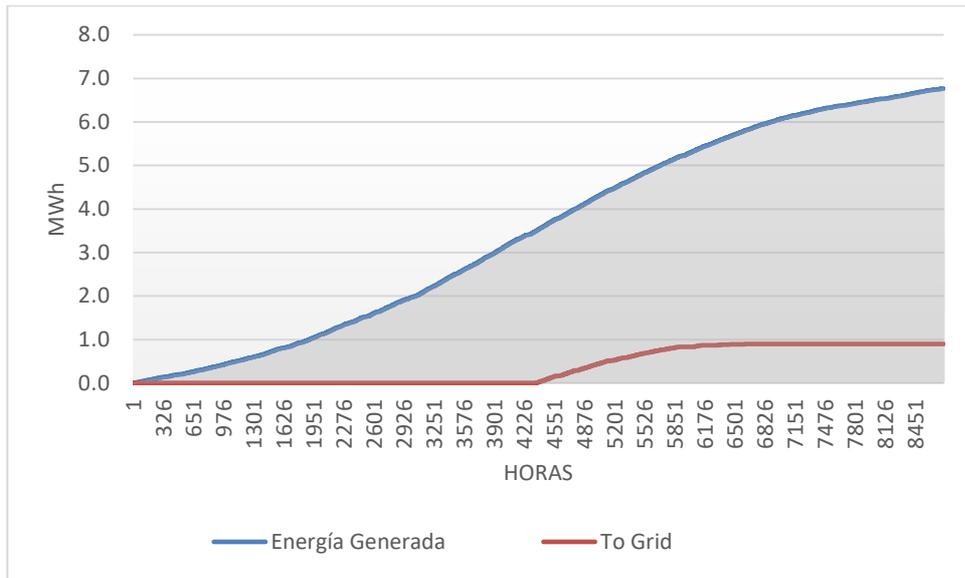
### 6.1.2 Porcentaje de excesos

Después, se realiza un análisis de la energía vertida a la red. Entonces, obtenemos un mayor porcentaje de excesos para el caso que el volumen del tanque es menor. Este resultado es debido a que hay una diferencia de energía almacenada en los distintos casos, hay menor capacidad de almacenamiento de energía y se tiene que desprender de esa energía. Sería interesante estudiar el valor diario de esa energía vendida a la red, ya que hay una diferencia aproximadamente de 0,1 MWh. Se muestra los valores de energía máxima hacia la red anual y los porcentajes de excesos y las gráficas para los diferentes casos.

- Energía “To Grid, 1” total: 0.8993 MWh
  - Energía “To Grid, 2” total: 0.96879 MWh
  - Energía generada total: 6.7661 MWh
- } % Excesos, 1 = 13,3%; %Excesos, 2 = 14,32 %

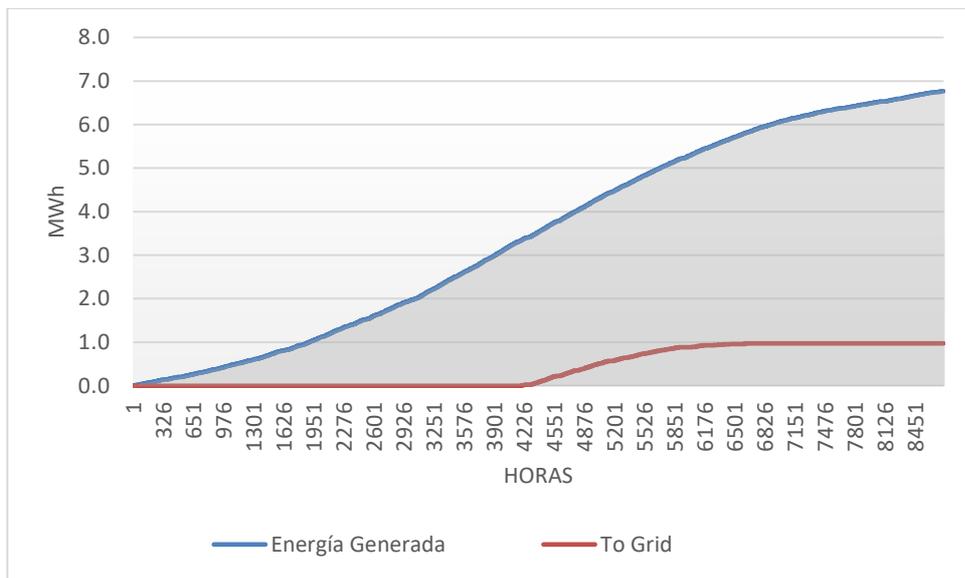
Tanque de hidruros metálico de 8.4m3:

**Figura 46.** To Grid vs Energía Generada, 3.



Tanque de hidruros metálico de 5.6m3:

**Figura 47.** To Grid vs Energía Generada, 4.



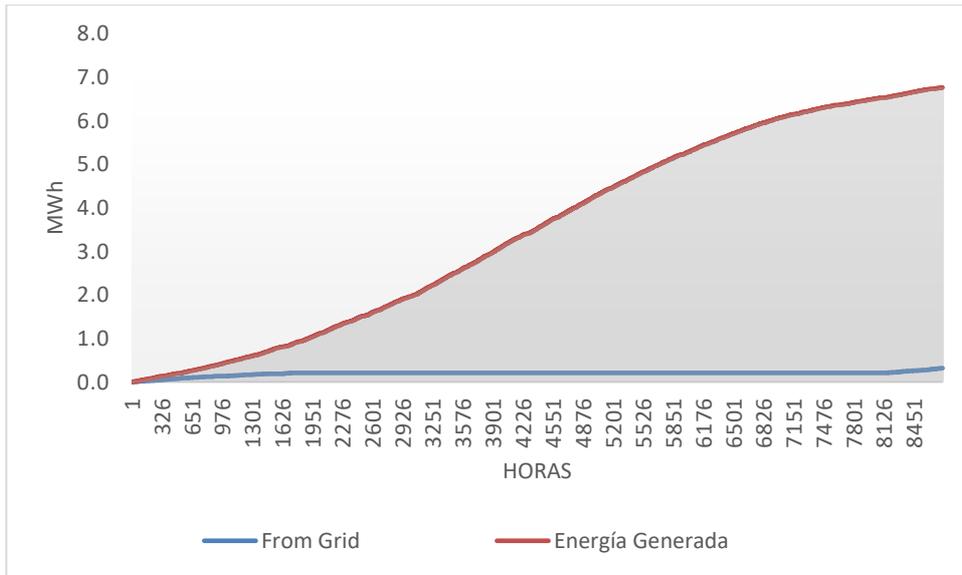
### 6.1.3 Porcentaje de deficits

Por otro lado, se estudia el porcentaje de deficits del sistema, al igual que en el analisis de resultados. Se observa que en el segundo caso es mayor, entorno al 0,3 por ciento. Esto quiere decir que aumenta la cantidad de energía comprada a la red. En el segundo caso aumenta el porcentaje, debido a que la capacidad del sistema es menor y necesita conectarse a la red en un mayor rango de tiempo.

- Energía “From Grid, 1” total: 0.3194 MWh
  - Energía “From Grid, 2” total: 0.3365 MWh
  - Energía generada total: 6.7661 MWh
- } % Deficits1 = 4,72 %; % Deficits2 = 5 %

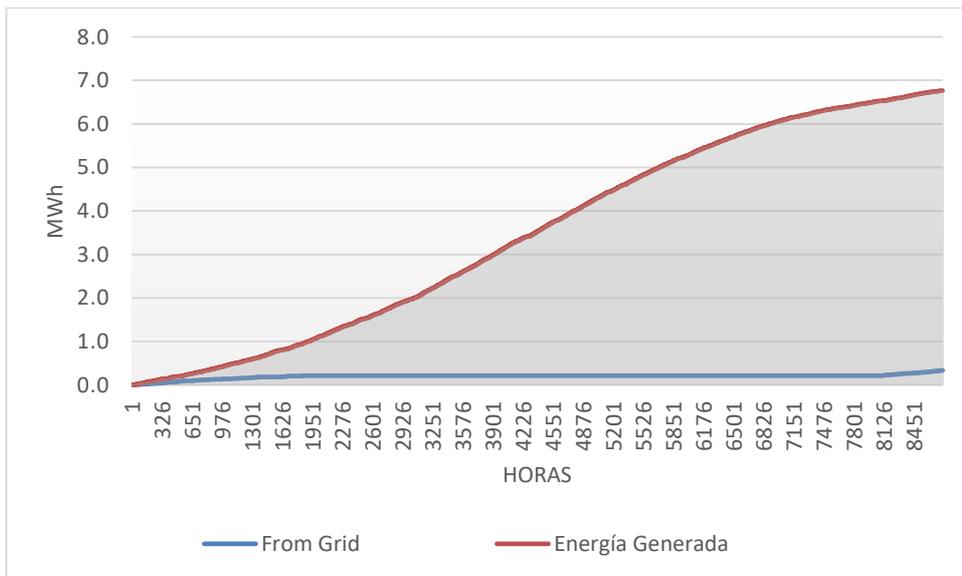
Tanque de hidruros metálico de 8.4m3:

**Figura 48.** From Grid vs Energía Generada, 3.



Tanque de hidruros metálico de 5.6m3:

**Figura 49.** From Grid vs Energía Generada, 4.



### 6.1.4 Resumen energético anual

Por último, se muestra un resumen de los valores comentados anteriormente. Además, se compara con el caso base inicialmente estudiado en el análisis de resultados.

**Tabla 4.** Resumen energético anual, 1

	Caso base	Caso aumento volumen	Caso disminución volumen
Energía cubierta, MWh	1.3654	1.3733	1.3617
Porcentaje excesos, %	14.1	13,3	14,32
Porcentaje deficits, %	4.9	4,72	5

## 6.2 Caso baterías

En este segundo caso, se estudia el aumento y decremento de volumen del tanque para el caso en el que el sistema de baterías es prioritario. Por tanto, al minorar y mayorar este volumen obtenemos de nuevo:

- Tanque de hidruros metálico de 8.4m<sup>3</sup>
- Tanque de hidruros metálico de 5.6m<sup>3</sup>

### 6.2.1 Cantidad de energía cubierta

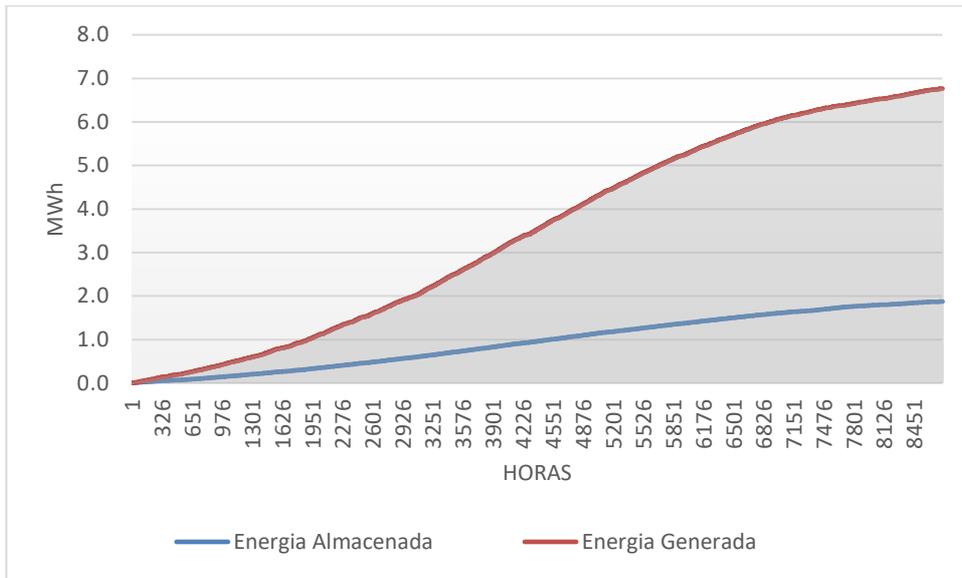
En este caso, no se produce una gran variación de energía cubierta por el sistema. Esto sucede porque el sistema que hemos modificado es el sistema secundario de almacenamiento, el tanque de hidrogeno. Entonces, se aprecia que cuando el sistema de batería es el almacenamiento primario, no tiene la misma importancia el tanque de hidrógeno, es decir, pasa a un segundo plano. En este apartado varía en orden de 3 kWh, antes 12 kWh. Se muestra los valores de energía máxima cubierta anual y las gráficas para los diferentes casos.

- Energía Cubierta total, 1: 1.8740 MWh
- Energía Cubierta total, 2: 1.8714 MWh



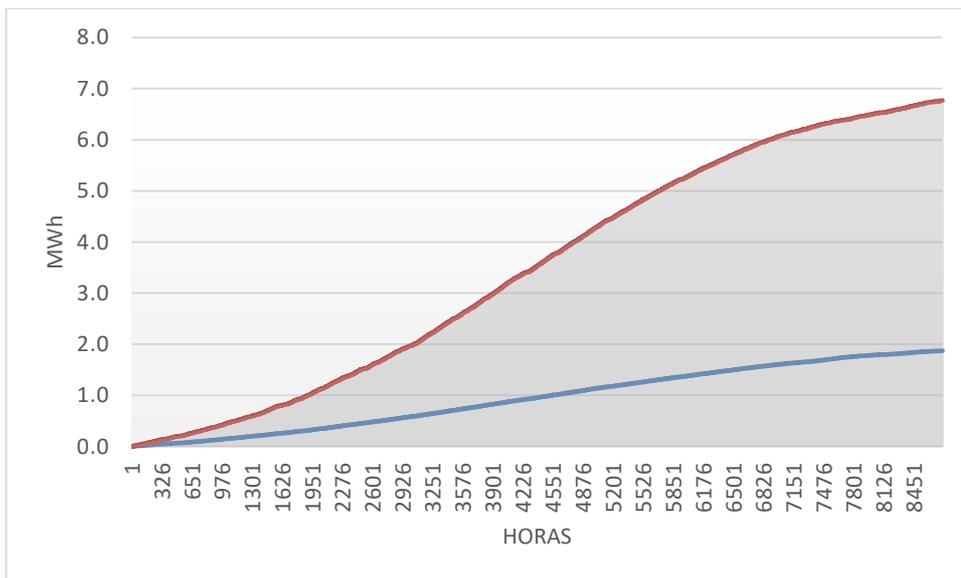
Tanque de hidruros metálico de 8.4m<sup>3</sup>:

**Figura 50. Energía Almacenada vs Energía Generada, 5.**



Tanque de hidruros metálico de 5.6m3:

**Figura 51. Energía Almacenada vs Energía Generada, 6.**



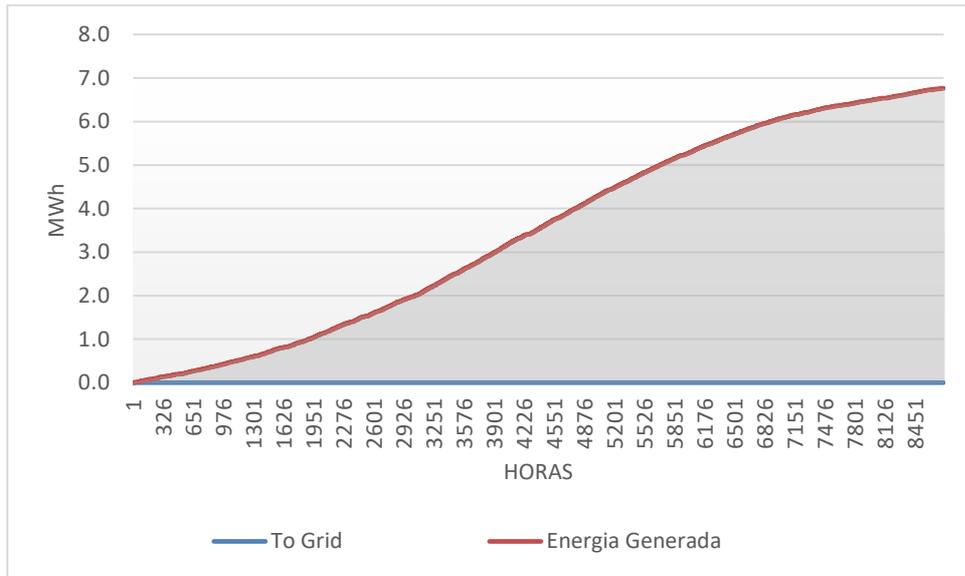
### 6.2.2 Porcentaje de excesos

En cuanto al porcentaje de excesos, no se produce variación del porcentaje. Esto quiere decir que el sistema de baterías no depende del volumen del tanque en este rango de valores. El sistema de baterías gestiona todos los excesos provenientes de la matriz fotovoltaica. Se muestra los valores de energía máxima hacia la red y las gráficas para los diferentes casos.

- Energía “To Grid, 1” total: 0.0 MWh
  - Energía “To Grid, 2” total: 0.0 MWh
  - Energía generada total: 6.7661 MWh
- } % Excesos, 1 = 0 %; %Excesos, 2 = 0 %

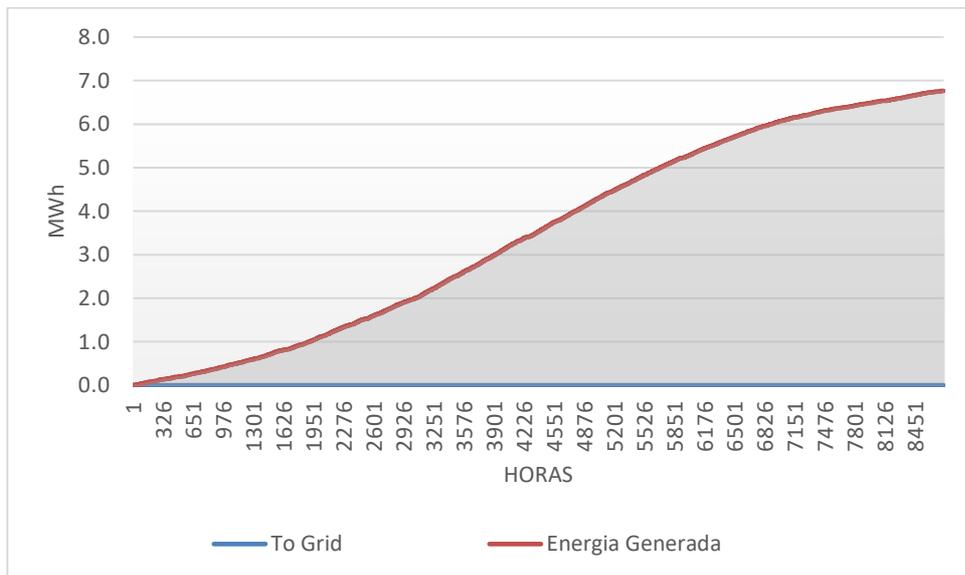
Tanque de hidruros metálico de 8.4m3:

**Figura 52.** To Grid vs Energía Generada, 5.



Tanque de hidruros metálico de 5.6m3:

**Figura 53.** To Grid vs Energía Generada, 6.



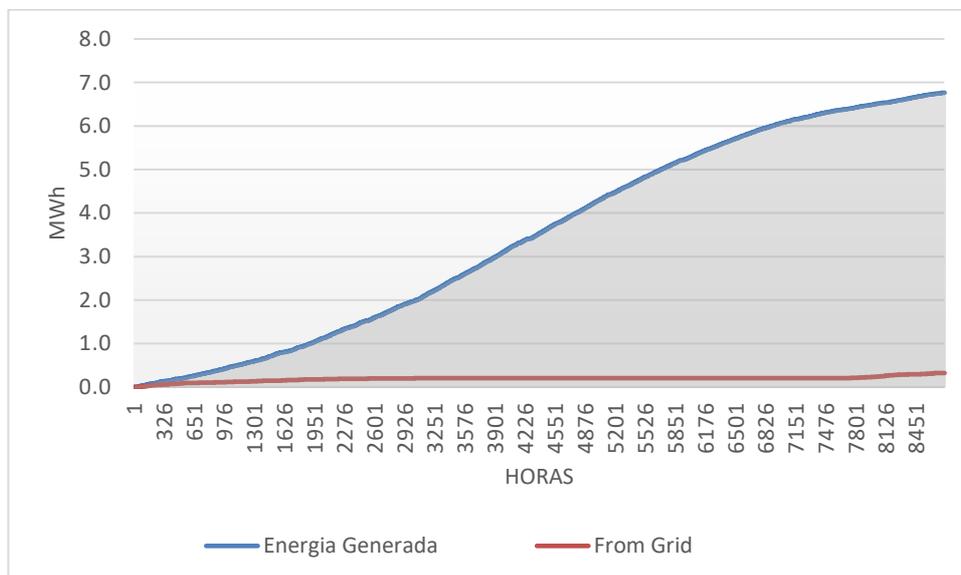
### 6.2.3 Porcentaje de deficits

Por otro lado, se estudia el porcentaje de deficits del sistema, al igual que en el analisis de resultados. Se observa que en el segundo caso es mayor, entorno al 0,1 por ciento. En el otro apartado varia 0.3 por ciento. A menor porcentaje de deficits menor energía comprada de la red. Entonces, se puede observar que en ambos caso son beneficiosos para el sistema, esto quiere decir que los defectos del sistema no depende directamente del volumen de tanque de hidrógeno. Se muestra los valores de energía máxima de la red y las gráficas para los diferentes casos.

- Energía "From Grid, 1" total: 0.3242MWh
  - Energía "From Grid, 2" total: 0.3281MWh
  - Energía generada total: 6.7661 MWh
- } % Deficits1 = 4.79 %; % Deficits2 = 4.85%

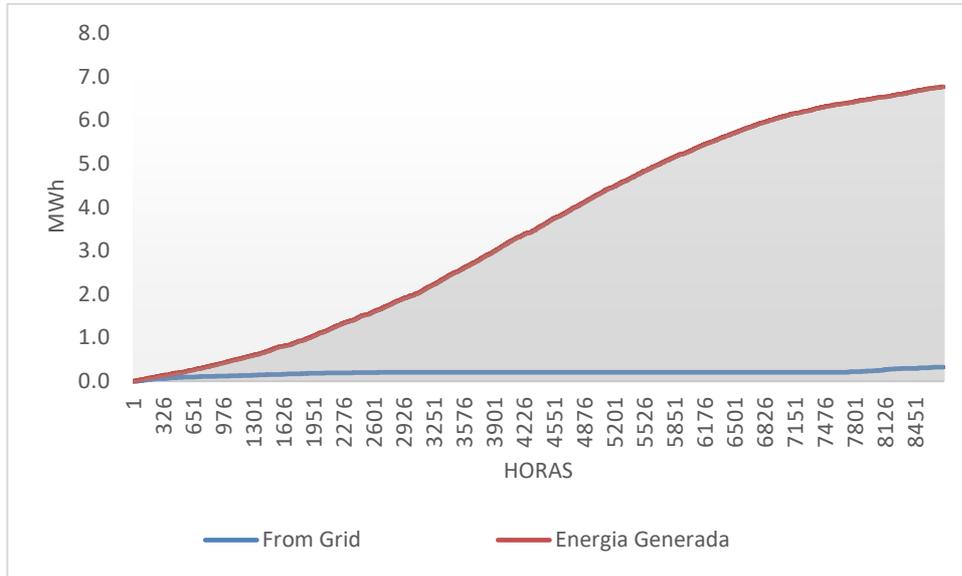
Tanque de hidruros metálico de 8.4m3:

**Figura 54.** From Grid vs Energía Generada, 5.



Tanque de hidruros metálico de 5.6m<sup>3</sup>:

**Figura 55.** From Grid vs Energía Generada, 6.



#### 6.2.4 Resumen energético anual

Por último, se muestra un resumen de los valores comentados anteriormente. Además, se compara con el caso base inicialmente estudiado en el análisis de resultados.

**Tabla 5.** Resumen energético anual, 2

	Caso base	Caso aumento volumen	Caso disminución volumen
Energía cubierta, MWh	1.3654	1.8740	1.8714
Porcentaje excesos, %	14.1	0	0
Porcentaje deficits, %	4.9	4.79	4.85

## 7 CONCLUSIONES

---

Este trabajo ha consistido en el estudio analítico de integración de una microrred con distintas tecnologías, sistema de producción y almacenamiento de hidrógeno y un sistema de respaldo, batería de plomo ácido. Para ello, se ha modelado el sistema en el software TRNSYS el cual ofrece el diseño, optimización, y análisis detallado de cualquier sistema cuyo comportamiento sea dependiente del paso del tiempo, es decir, régimen transitorio.

Dicho sistema se ha diseñado en gran parte tomando las características de los componentes de la instalación establecida en el Departamento de Ingeniería Energética (Universidad de Sevilla, US). Además de tomar como referencia una instalación existente en cuanto a valores de los parámetros característicos, como perfil de demandas eléctrica.

Para los dos casos diferentes se hace énfasis en los mismos parámetros, la producción y demanda de energía, estado de carga del sistema híbrido, la cantidad de energía cubierta, el porcentaje de excesos y déficits. En primer lugar, la generación y demanda de los distintos casos son semejantes. Aunque, gestionan de forma diferente los excesos de energía dando lugar distintas gráficas de estados de carga.

En primer lugar, se puede apreciar en el caso base como la cobertura de energía es menor frente al análisis de sensibilidad. Esto es debido a la gestionabilidad de la batería frente al tanque de hidrógeno. En el caso base, se podría ganar cobertura utilizando tanques con mayor volumen o presión de trabajo dentro de él. Es decir, apostar por diferentes tecnologías como el almacenamiento del gas a alta presión o trabajar con grandes depósitos como cuevas geológicas donde se pueda introducir este combustible. Aunque, habría que hacer un estudio de la viabilidad económica.

Después, se realiza un estudio del porcentaje de excesos con respecto a la energía generada por los paneles fotovoltaicos. Como se expresa anteriormente, al haber mayor cobertura en el caso de preferencia de la batería, se ratifica que la batería aprovecha de mejor forma la energía producida. Debido a que disminuye la cantidad de energía vertida a la red. Los rápidos ciclos de carga y descarga de la batería hace que aproveche favorablemente la energía. Por último, el porcentaje de déficits de energía no ha disminuido.

Además, se pueden sacar diferentes conclusiones en el análisis de sensibilidad y es que a mayor volumen del tanque mayores son los excesos del sistema y mayor es la energía cubierta por el sistema. Además, en líneas generales aumenta la energía vertida a red y disminuye la energía proveniente de la red. Sería de estudio ver la diferencia económica entre vender y comprar energía, enlazado con el coste del tanque de mayor capacidad.

En definitiva, actualmente la implantación de este tipo de sistemas híbridos en el corto y largo plazo son interesantes. Si es verdad que tienen sus carencias siendo el sistema implantado actualmente el más favorable (sistema en el que la batería es preferente). Uno de los motivos de su dificultad de implantación son los costes de batería y depósitos de hidrógeno. Pero en vista de sus ventajas energéticas y medioambientales respecto a los sistemas de producción convencionales, harán posibles su viabilidad futura.

# REFERENCIAS

- [1] “bp-energy-outlook-2019”, Accessed: Dec. 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>
- [2] E. US, “Temario de la asignatura Sistemas basados en el hidrógeno”.
- [3] “Propiedades del hidrógeno (H).” [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h\\_18653](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h_18653) (accessed Dec. 08, 2022).
- [4] M. para la Transición and E. el Reto Demográfico, “Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el Hidrógeno Renovable”.
- [5] Prof. Dr. Ad van Wijk and Jorgo Chatzimarkakis, “Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative.” [https://dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2020/04/2020-04-01\\_Dii\\_Hydrogen\\_Studie2020\\_v13\\_SP.pdf](https://dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2020/04/2020-04-01_Dii_Hydrogen_Studie2020_v13_SP.pdf) (accessed Dec. 08, 2022).
- [6] “¿Qué es una microgrid?” <http://www.laenergiadelcambio.com/que-es-microgrid/> (accessed Dec. 08, 2022).
- [7] “Microrredes, útiles para cada ocasión | Extra Energía | EL PAÍS.” <https://elpais.com/extra/energia/2022-05-22/microrredes-utiles-para-cada-ocasion.html> (accessed Dec. 08, 2022).
- [8] L. L. Jansen, N. Andreadou, I. Papaioannou, and A. Marinopoulos, “Smart grid lab research in Europe and beyond,” *Int J Energy Res*, vol. 44, no. 3, pp. 1307–1336, Mar. 2020, doi: 10.1002/ER.4818.
- [9] “Blog | BloombergNEF ‘State of the Micro-Grid Market.’” <https://about.bnef.com/blog/?tactic-page=443267> (accessed Dec. 08, 2022).
- [10] R. Galera Sobrino, “Automatización de una microrred con el modelo de programación de PLCopen y gestión energética con control heurístico,” 2019, Accessed: Dec. 08, 2022. [Online]. Available: <https://idus.us.es/handle/11441/95282>
- [11] “5-ceecn-esquema-microrred CONSTRUIBLE.” <https://www.construible.es/comunicaciones/comunicacion-edificios-energia-casi-nula-utilizando-recursos-generacion-distribuida-solar-eolica-biomasa-microrredes-inteligentes/5-ceecn-esquema-microrred> (accessed Dec. 08, 2022).
- [12] “¿Cómo funcionan las células solares fotovoltaicas?” <https://ecoinventos.com/celulas-solares-fotovoltaicas/> (accessed Dec. 08, 2022).
- [13] “Qué es la Energía Eólica, cómo funciona y sus ventajas - Iberdrola - Iberdrola.” <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica> (accessed Dec. 08, 2022).
- [14] E. US, “Temario de la asignatura Energía Renovables”.
- [15] D. M. Dña *et al.*, “Anales de la Real Academia de Doctores de España Volumen 14,” pp. 71–91, 2010.
- [16] J. C. Ruiz-Morales, J. Canales-Vázquez, C. Savaniu, D. Marrero-López, W. Zhou, and J. T. S. Irvine, “Disruption of extended defects in solid oxide fuel cell anodes for methane oxidation,” *Nature*, vol. 439, no. 7076, pp. 568–571, Feb. 2006, doi: 10.1038/NATURE04438.
- [17] “Almacenamiento de energía eficiente - Iberdrola.” <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/almacenamiento-de-energia-eficiente> (accessed Dec. 08, 2022).
- [18] “Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques | Apilados.” <https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/> (accessed Jan. 16, 2023).

- 
- [19] “Métodos de almacenamiento del hidrógeno | SynerHy.” <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/> (accessed Jan. 16, 2023).
- [20] “Almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos - Norvento - Norvento.” <https://www.norvento.com/blog/almacenamiento-hidrogeno/> (accessed Jan. 02, 2023).
- [21] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,” *Appl Energy*, vol. 137, pp. 511–536, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.09.081.
- [22] M. López-Tafall Criado, “Análisis de la viabilidad de la implantación de microrredes en España. Consideraciones técnicas, regulatorias y económicas,” 2018, Accessed: Dec. 08, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/22737>
- [23] “Bienvenido | TRNSYS: herramienta de simulación de sistemas transitorios.” <https://www.trnsys.com/> (accessed Dec. 08, 2022).

Se aporta información sobre los Inputs, Outputs y parámetros de cada Type descritos en el esquema inicial, véase la figura 30 para la mayor comprensión de los datos.

### Datos Climáticos:

Se ha utilizado un archivo climático de Sevilla.

**Tabla 6.** Parámetros del archivo climáticos.

Parámetro	Valor
File Type	6
Tracking mode	1
Number of surface	1
Logical Unit	39

**Tabla 7.** Inputs del archivo climático.

Parámetro	Valor
Ground reflectance	0.2
Slope of surface	Latitud Sevilla (7 metros)
Azimuth of surface	0

Los Outputs del lector meteorológico es extenso, en función del sistema se hace uso de unos u otros. Se reflejan los outputs utilizados.

**Tabla 8.** Outputs del archivo climático.

Parámetro	Unidades	Destino
Dry bulb temperature	°C	Calculadora “Kelvin”
Total horizontal radiation	kJ/hr m <sup>2</sup>	Modulo Fotovoltaico
Beam radiation surface	kJ/hr m <sup>2</sup>	“ “
Angle of incidence for surface	°	“ “
Slope of surface	°	“ “
Total diffuse radiation for surface	kJ/hr m <sup>2</sup>	“ “

Módulo Fotovoltaico:**Tabla 9.** Parámetros módulo fotovoltaico.

Parámetro	Unidades	Valor
Module short-circuit current at reference conditions	A	8.79
Module open-circuit voltage at reference conditions	V	37.62
Reference temperature	K	298
Reference insolation	W/m <sup>2</sup>	1000
Module voltage at max power point and reference conditions	V	30.35
Module current at max power point and reference conditions	A	8.24
Ambient temperature at NOCT	K	293
Number of cells wired in series	--	60
Number of modules in series	--	10
Number of modules in parallel	--	2
Module area	m <sup>2</sup>	1.63

**Tabla 10.** Inputs módulo fotovoltaico.

Parámetro	Unidades	Valor
Total incident radiation	kJ/hr m <sup>2</sup>	-
Ambient temperature	K	-
Array slope	°	-
Beam radiation	kJ/hr m <sup>2</sup>	-
Diffuse radiation	kJ/hr m <sup>2</sup>	-
Incidence angle of beam radiation	°	-
Total incident radiation	kJ/hr m <sup>2</sup>	-

Los valores dependerán del instante de tiempo debido a que la climatología es variante con el tiempo.

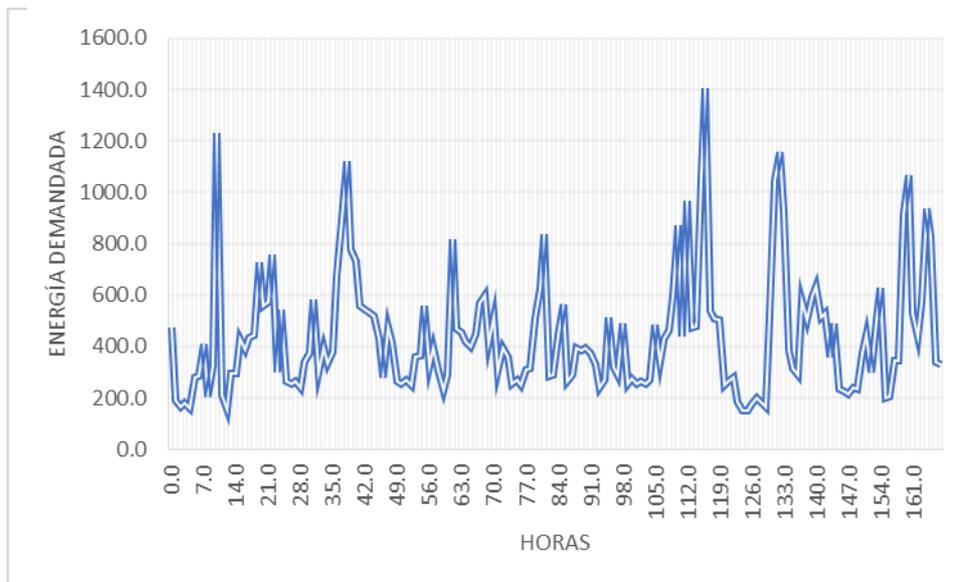
**Tabla 11.** Outputs módulo fotovoltaico.

Parámetro	Unidades	Destino
Power at maximum power point	W	Calculadora “Equa”. Generación.

Perfil demanda:

Se han utilizado los datos recogidos del laboratorio “HyLab”. Se representa la energía promedio.

**Tabla 12.** Inputs perfil demanda promedio.



**Tabla 13.** Outputs perfil demanda.

Parámetro	Unidades	Destino
Function	W	Calculadora “Equa”. Demanda

Calculadora:

Se calculará los excesos y déficit del sistema:

$$Excendetes = GT \times (Generación, Demanda) \times (Generación - Demanda)$$

Donde:

GT= 1 si la Generación > Demanda y 0 si la Demanda < Generación

**Tabla 14.** Inputs calculadora.

Parámetro	Unidades	Valor/Proviene
Generación	W	Depende del instante de tiempo / Calculadora
Demanda	W	Depende del instante de tiempo / Calculadora

**Tabla 15.** Outputs calculadora.

Parámetro	Unidades	Destino
Excedentes	W	Controlador. Depende del instante de tiempo
Déficit	W	Inversor (2) <sup>1</sup> . Depende del instante de tiempo

Controlador:

Gestiona el exceso de energía y la señal al electrolizador.

**Tabla 16.** Parámetros controlador.

Parámetro	Unidades	Valor
Lower SOC limit	-	0.7
Upper SOC limit	-	0.9
Idling power	W	100

<sup>1</sup> Inversor 2. Rama de la pila combustible

**Tabla 17.** Inputs controlador.

Parámetro	Unidades	Valor/Proviene
Tank SOC	-	0.2 / Tanque
Power to electrolyzer	W	Excedentes (t) / Electrolizador

**Tabla 18.** Outputs controlador.

Parámetro	Unidades	Destino
Electrolyzer control signal	-	Electrolyzer. 0 o 1. Depende del tiempo, (t) <sup>2</sup>
Power set point (1)	W	Inversor (1) <sup>3</sup>

Inversor:

Utilizado para calcular los valores de intensidad mediante un bucle.

Hay dos inversores: Inversor 1 conecta con la rama del electrolizador. Y el inversor 2 conecta con la rama de la pila de combustible.

**Tabla 19.** Parámetros Inversor.

Parámetro	Unidades	Valor
Nominal power (1)	W	3500
Nominal power (2)	W	3000
Set point voltage	V	2.06

<sup>2</sup> (t); Depende del tiempo

<sup>3</sup> (1) Inversor 1. Rama del electrolizador

**Tabla 20.** Inputs Inversor.

Parámetro	Unidades	Valor/Proviene
Input voltage (1)	V	Electrolyzer voltage (t) / Electrolizador
Input voltage (2)	V	Stack voltage (t) / Pila combustible
Input power (1)	W	Controlador
Input power (2)	W	Calculadora

**Tabla 21.** Outputs Inversor.

Parámetro	Unidades	Destino
Outputs current (1)	A	Electrolizador
Outputs current (2)	A	Pila Combustible

Electrolizador:**Tabla 22.** Parámetros electrolizador.

Parámetro	Unidades	Valor
Electrode area	m <sup>2</sup>	0.10
Number of cells is series	-	14
Number of stacks in parallel	-	1
Minimum allowable cell voltage	V	1.3

**Tabla 23.** Inputs electrolizador

Parámetro	Unidades	Valor/Proviene
Electrolyzer control signal	-	0 o 1 en función de (t) / Controlador
Electrolyzer current	A	Outputs current / Inversor (1)

**Tabla 24.** Outputs electrolizador

Parámetro	Unidades	Destino
Hydrogen production rate	m <sup>3</sup> /hr	Tanque

Pila de combustible:**Tabla 25.** Parámetros pila de combustible

Parámetro	Unidades	Valor
Number of cells in series per stack	--	11
Number of stacks in parallel per module	--	1
Electrode area	cm <sup>2</sup>	232
PEM thickness	cm	0.0118

**Tabla 26.** Inputs pila combustible.

Parámetro	Unidades	Valor/Proviene
Output current	A	Inversor (2)

**Tabla 27.** Outputs pila combustible.

Parámetro	Unidades	Destino
Hydrogen consumption	m <sup>3</sup> /hr	Tanque

Tanque:**Tabla 28.** Parámetros tanque.

Parámetro	Unidades	Valor
Maximum pressure	bar	5
Tank volume	m <sup>3</sup>	7

**Tabla 29.** Inputs tanque.

Parámetro	Unidades	Valor/Proviene
Volumetric rate of gas entering the tank	m <sup>3</sup> /hr	Electrolizador
Volumetric rate of gas exiting the tank	m <sup>3</sup> /hr	Pila combustible

**Tabla 30.** Outputs tanque.

Parámetro	Unidades	Destino
Pressure level	-	Controlador y Calculadora

Batería:

**Tabla 31.** Parámetros Batería.

Parámetro	Unidades	Valor
Cell Energy Capacity	Ah	1100
Cells in parallel	-	1
Cells in series	-	24

**Tabla 32.** Input Batería.

Parámetro	Unidades	Proviene
Power to or from battery	W	Inversor

**Tabla 33.** Output Batería.

Parámetro	Unidades	Destino
Fractional state of charge	-	Controlador de carga

Controlador de carga:

Es el equipo que funciona como gestor de la batería y de inversor de energía.

**Tabla 34.** Parámetros Controlador de carga.

Parámetro	Unidades	Valor
Inverter efficiency	-	1
High limit on fractional state of charge (SOC)	-	0.9
Low limit on SOC	-	0.1

**Tabla 35.** Inputs Controlador de carga

Parámetro	Unidades	Proviene
Input power	-	Calculadora
Load power	-	Calculadora

**Tabla 36.** Outputs Controlador de carga.

Parámetro	Unidades	Destino
Power to or from battery	W	Calculadora

Hay que destacar que estas variables han sido utilizadas para generar el caso base. Entonces, se han utilizado más variables de salida para estudiar la simulación, es decir, para generar las gráficas o tablas. Entre las variables utilizadas: eficiencia del electrolizador, potencia perdida, potencia perdida auxiliar, etc.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que se han modificado algunos de los datos para el estudio del análisis de sensibilidad.

