

## Trabajo Fin de Máster

Diseño, montaje, puesta en marcha y análisis energético de un sistema de generación de hidrógeno, y su uso en un vehículo eléctrico con pila PEM

Autor

**Andrés Nueno Mairal**

Directores

Dr. Félix M. Barreras Toledo  
Dr. Antonio Lozano Fantoba

Ponente

Prof. Inmaculada Arauzo Pelet

Escuela de Ingeniería y Arquitectura-Universidad de Zaragoza  
2016



# Agradecimientos

Quiero agradecer al Laboratorio de Investigación LIFTEC (CSIC-UZ) que me haya permitido realizar mi Proyecto de Fin de Máster en sus instalaciones, a los directores Dr. Félix M. Barreras Toledo y Dr. Antonio Lozano Fantoba por su supervisión durante la realización de este proyecto y a la ponente del mismo la Prof. Inmaculada Arauzo Pelet.

Me gustaría reconocer enormemente todo el conocimiento y experiencia aportada por D. Vicente Roda Serrat y también a todo el personal y colaboradores del instituto por su acogida y buen ambiente de trabajo.

He de agradecer muy especialmente a mi familia y amigos por su ayuda y apoyo durante todo este tiempo.

Como experiencia profesional, este proyecto me ha servido de introducción al mundo de la investigación y me ha aportado muchos conocimientos sobre una tecnología muy prometedora y sin duda muy útil para el futuro.



# Resumen

---

El desarrollo de tecnologías que permitan la producción de hidrógeno a partir de energías renovables responde a una necesidad evidente de buscar nuevas alternativas energéticas con bajos niveles de contaminación, así como para aumentar la eficiencia energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

En el presente proyecto se ha realizado el diseño, el montaje, así como la puesta a punto y otras pruebas operacionales de un sistema compuesto por una estación de generación y almacenamiento de hidrógeno alimentados por el excedente de energía eléctrica fotovoltaica de una instalación agrícola aislada. El hidrógeno generado se emplea en un vehículo eléctrico de baterías, el cual se ha modificado para convertirse en un FC-PHEV basado en una pila de combustible en lugar de un motor de combustión interna. Para su realización, se han seleccionado todos los equipos para la producción, almacenamiento y suministro de hidrógeno, así como el diseño de diversos elementos para su adecuada instalación y control.

Una vez concluido el montaje, se han realizado pruebas operacionales y simulaciones para la correcta puesta a punto. Entre ellas están: el acondicionamiento y caracterización experimental de la pila de hidrógeno en el banco de ensayos del LIFTEC, la verificación del sistema de circulación de gases del vehículo, el repostaje de hidrógeno o el análisis del consumo energético del vehículo. Tras la finalización del proyecto se dispondrá de un sistema aislado de generación y almacenamiento de hidrógeno a pequeña escala que permitirá el uso de este gas como alternativa al gasóleo en la propulsión de un vehículo agrícola.

Después de una breve introducción en la que se propone al hidrógeno como alternativa energética, se lleva a cabo la descripción y el estado actual de la tecnología de generación de hidrógeno centrada en la electrólisis, su almacenamiento y posterior aplicación en vehículos eléctricos. Así mismo, se expone el estado del arte de las pilas de combustible de tipo PEM. En el tercer capítulo se detalla el dimensionamiento y el diseño de la hidrogenera, definiendo los equipos necesarios para la producción y almacenamiento de hidrógeno. En el cuarto capítulo se describe el diseño y las modificaciones realizadas en el vehículo eléctrico de baterías para que sea propulsado híbridamente con una pila PEM. En el quinto capítulo se encuentran los cálculos y simulaciones realizadas, y para finalizar, en el sexto capítulo se exponen las conclusiones que se desprenden del trabajo realizado y el trabajo futuro a realizar, seguidos de las referencias bibliográficas y de los anexos, donde se puede encontrar información ampliada y detallada.





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Andrés Bueno Mairal,

con nº de DNI 18048964J en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Máster, (Título del Trabajo)

Diseño, montaje, puesta en marcha y análisis energético de un sistema de  
generación y almacenamiento de hidrógeno, y su uso en un vehículo eléctrico  
con pila PEM.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada  
debidamente.

Zaragoza, a 20 de junio de 2016

Fdo: Andrés Bueno Mairal





# Índice de contenidos

---

1- Introducción .....	1
1.1- Antecedentes .....	1
1.2- Hidrógeno como alternativa .....	2
2- Tecnologías del hidrógeno y su uso en vehículos de pila de combustible .....	5
2.1- Producción de hidrógeno.....	5
2.2- Producción de hidrógeno mediante electrólisis.....	7
2.2.1- Electrolizadores .....	7
2.2.2- Impacto ambiental .....	8
2.2.3- Costes de generación.....	8
2.3- Almacenamiento de hidrógeno .....	10
2.3.1- Almacenamiento energético de hidrógeno vs baterías .....	11
2.4- Pilas de combustible.....	13
2.4.1- Pilas de combustible de membrana polimérica .....	13
2.4.2- Potencial de la celda y curva de polarización .....	14
2.4.3- Eficiencia de una pila de combustible.....	15
2.5- Vehículos eléctricos .....	15
2.5.1- Vehículos con pila de combustible.....	16
3- Diseño y montaje de una hidrogenera en una instalación aislada .....	19
3.1- Descripción y características de la instalación aislada.....	19
3.1.1- Ubicación .....	20
3.1.2- Recursos renovables.....	21
3.1.3- Dimensionado de la instalación .....	22
3.1.4- Diseño de la instalación fotovoltaica .....	23

3.2- Instalación de generación y almacenamiento de hidrógeno.....	24
3.2.2- Dimensionado de la instalación .....	26
3.2.3- Diseño de la hidrogenera.....	26
3.2.4- Equipos.....	29
3.2.5- Sistema de control y seguridad .....	33
4- Diseño y montaje del sistema híbrido con pila PEM en un vehículo eléctrico comercial .....	35
4.1- Descripción del vehículo.....	35
4.2- PEMFC del vehículo .....	36
4.2.1- Curvas de polarización .....	37
4.2.2- Ensayos experimentales de la pila.....	38
4.3- Implementación del sistema de pila de combustible en el vehículo .....	40
4.3.1- Diseño del alojamiento para los diferentes sistemas.....	40
4.3.2- Diseño del sistema de almacenamiento, recarga y alimentación .....	43
4.3.3- Sistema electrónico de acondicionamiento de potencia.....	45
4.3.4- Máquina de estados de la pila y sistema de control .....	46
5- Cálculos y simulaciones .....	49
5.1- Vehículo .....	49
5.1.1- Recarga del vehículo .....	49
5.1.2- Consumo eléctrico del vehículo .....	50
5.2- Hidrogenera.....	51
5.2.1- Generación de hidrógeno .....	51
5.2.2- Compresión .....	51
5.2.3- Rack de bombonas .....	51
6- Conclusiones y trabajo futuro .....	53
6.1- Conclusiones .....	53
6.2- Trabajos a realizar en el futuro.....	55
7- Bibliografía .....	57

# Índice de figuras

---

Figura 1.1: Reducción de emisiones por sectores.....	2
Figura 1.2: Sistema energético basado en el hidrógeno. ....	3
Figura 2.1: Procesos de producción de hidrógeno.....	5
Figura 2.2: Costes de generación al 100 % de capacidad de utilización para un electrolizador alcalino.....	9
Figura 2.3: Gráfica Ragone de distintos métodos de almacenamiento de energía. ....	11
Figura 2.4: Pérdidas de voltaje en la pila de combustible. ....	14
Figura 3.1: Ubicación de Viñas del Vero. ....	20
Figura 3.2: Balsa de riego y EDAR.....	20
Figura 3.3: Irradiación a lo largo del año. ....	21
Figura 3.4: Irradiación media diaria mensual medida in situ. ....	21
Figura 3.5: Baterías. ....	24
Figura 3.6: Esquema general del sistema de generación de hidrógeno. ....	25
Figura 3.7: Interior de la caseta. ....	27
Figura 3.8: Panel de distribución de hidrógeno.....	28
Figura 3.9: Alzado de la hidrogenera. ....	29
Figura 3.10: ECOMATIC.....	29
Figura 3.11: Electrolizador.....	30
Figura 3.12: Compresor de hidrógeno.....	31
Figura 3.13: Rack de bombonas y sistemas de suministro.....	32
Figura 3.14: Imagen del programa de control. ....	33

Figura 4.1: Vehículo comercial eléctrico ePath 7000.....	35
Figura 4.2: Volquete trasero del vehículo desmontado. ....	36
Figura 4.3: Curva de voltaje-intensidad de la H-3000.....	38
Figura 4.4: Curva de polarización experimental de la H-3000.....	39
Figura 4.5: Temperatura del stack y consumo de los ventiladores en función de la corriente generada.....	40
Figura 4.6: Esquema de la distribución del espacio en el volquete (I).....	41
Figura 4.7: Esquema de la distribución del espacio en el volquete (II).....	42
Figura 4.8: Foto del volquete trasero del vehículo cerrado, con todos los sistemas y dispositivos instalados. ....	42
Figura 4.9: Geometría del Venturi.....	44
Figura 4.10: Esquema eléctrico del vehículo híbrido. ....	45
Figura 4.11: Esquema de la máquina de estados de la pila. ....	46
Figura 5.1: Evolución de las presiones. ....	49
Figura 5.2: Porcentaje de energía eléctrica útil acumulada. ....	50

# Índice de tablas

---

Tabla 2.1: Eficiencia y coste de distintas tecnologías de producción de hidrógeno. ....	6
Tabla 2.2: Características de los electrolizadores.....	8
Tabla 2.3: Estado actual de varias tecnologías de almacenamiento de hidrógeno. ....	10
Tabla 2.4: Estado del arte de las baterías.....	12
Tabla 2.5: Comparación de las especificaciones de los vehículos desde la perspectiva del cliente.....	15
Tabla 2.6: Pilas de combustible comerciales para el sector del transporte.....	17
Tabla 3.1: Producción fotovoltaica mensual. ....	23



# 1-Introducción

---

## 1.1-Antecedentes

Desde la revolución industrial los combustibles fósiles han supuesto la principal fuente de energía, sustentándose en ellos la base de la economía mundial. En la actualidad, el 88% de la demanda energética se cubre con estos recursos, lo que provoca una fuerte dependencia y conlleva unas importantes repercusiones tanto económicas como medioambientales, ya que generan gases de efecto invernadero causantes del cambio climático. Además, al tratarse de una fuente de energía no renovable, sus reservas se agotarán en un futuro próximo, por lo que el modelo energético actual resulta insostenible [1].

El sector del transporte es uno de los principales focos de emisión de gases de efecto invernadero del planeta, ya que representa en torno al 20% de dichas emisiones. El parque móvil mundial cuenta en la actualidad con aproximadamente 800 millones de vehículos, y está previsto que se alcancen los 1.100 millones en el año 2020, lo que supone un incremento de un 2,4 % en la demanda de energía primaria. Con el objetivo de reducir las emisiones a corto plazo, la Unión Europea se ha comprometido para el año 2020 a disminuir las emisiones un 20% por debajo de los niveles del año 1990, con un objetivo final a largo plazo del 80 % en 2050 [2]. Esto supondría una reducción del uso de combustibles fósiles del 95% para el sector del transporte [3].

En el libro blanco del transporte [4] se establece el objetivo de crear un sistema competitivo y eficiente que elimine las emisiones de carbono y reduzca la dependencia de combustibles importados para lograr los objetivos de la Unión Europea, entre los cuales también se incluye el aumento del uso de energías renovables. El uso de vehículos eléctricos, entre los cuales se pueden distinguir los de batería (BEV), los de pila de combustible (FCEV) y los híbridos enchufables (PHEV), es necesario para alcanzar las pautas de reducción de emisiones establecidas por la Unión Europea.

Respecto a los combustibles alternativos, existe un plan de acción impulsado por la Unión Europea que promociona tres alternativas: los biocarburantes, el gas natural y el hidrógeno. Mediante la promoción de estos combustibles se logrará sustituir el 20% de los combustibles fósiles utilizados en el sector del transporte en Europa [5].

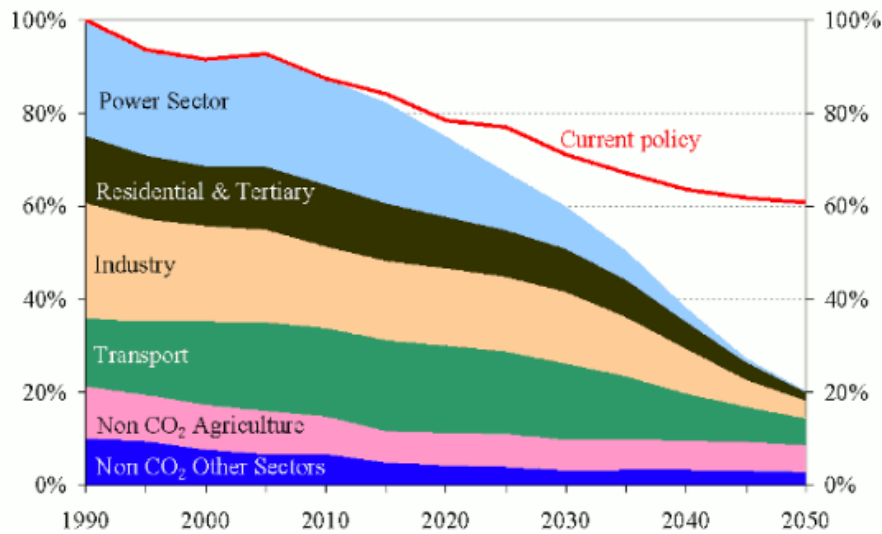


Figura 1.1: Reducción de emisiones por sectores.

## 1.2-Hidrógeno como alternativa

Para cumplir los objetivos planteados, es necesario el cambio del sistema energético actual por fuentes de energía que sean baratas, renovables, no contaminantes, y que puedan ser producidas en cualquier lugar del mundo, evitando así los monopolios. Una de las alternativas que con mayor fuerza se perfila es la del hidrógeno [6]. El hidrógeno cuenta con numerosas ventajas asociadas a su uso, ya que puede producirse a partir de fuentes renovables de energía, puede transformarse directamente en electricidad con un alto rendimiento en pilas de combustible o servir como combustible limpio ya que no emite CO<sub>2</sub>, ni óxidos de azufre o de nitrógeno si se quema con oxígeno en vez de aire. También permite el almacenamiento de energía de las fuentes renovables intermitentes [7] [8]. Pero esta tecnología aún debe superar importantes barreras tecnológicas, económicas y sociales.

Una de las principales características de esta tecnología es que el hidrógeno es un vector energético, es decir, de él podemos obtener energía, pero no sin una transformación previa ya que en la naturaleza sólo se encuentra combinado con otros elementos, principalmente en forma de agua. Así, el hidrógeno obtenido será tan limpio como lo sea la energía primaria utilizada para obtenerlo. Por lo tanto se precisa del desarrollo de una tecnología que permita aumentar la eficiencia de los procesos de obtención de forma sostenible y ecológica.



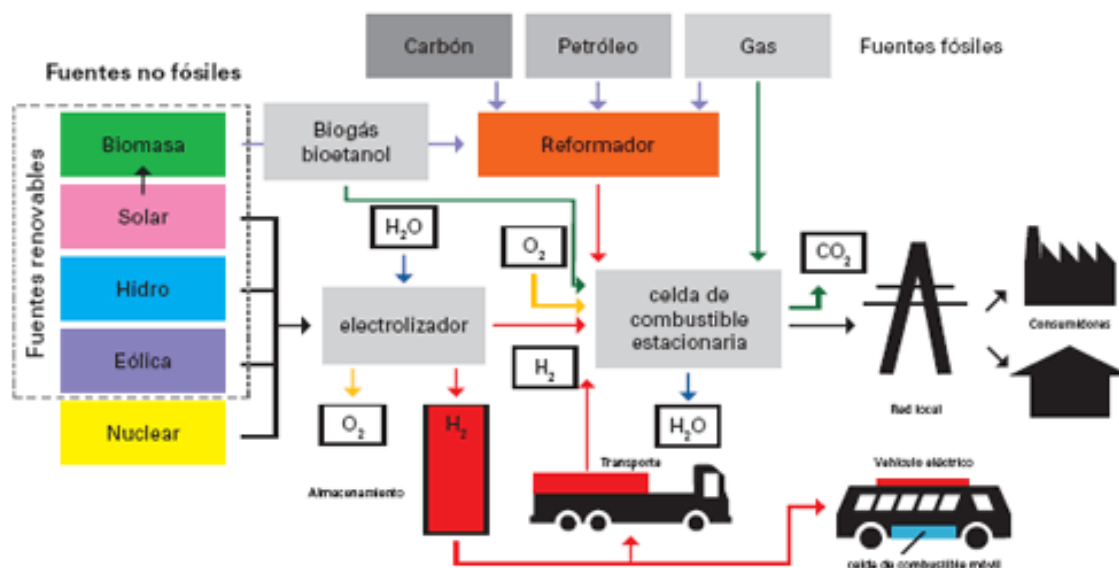


Figura 1.2: Sistema energético basado en el hidrógeno.

Otra barrera por superar es la de su almacenamiento, debido a su baja densidad energética. En la actualidad se está investigando el desarrollo de tanques a muy alta presión, adsorbentes porosos e hidruros metálicos que permitan almacenar grandes cantidades de este gas en un espacio reducido, con un menor consumo de energía.

El hidrógeno producido se puede utilizar directamente como fuente de energía por medio de la combustión directa, ofreciendo grandes ventajas medioambientales y en cuanto a rendimiento frente a los combustibles fósiles, o bien mediante una reacción electroquímica que genere directamente electricidad (y calor) en una pila de combustible.



# 2-Tecnologías del hidrógeno y su uso en vehículos de pila de combustible

## 2.1-Producción de hidrógeno

El hidrógeno puede ser producido a partir de cualquier sustancia que contenga hidrógeno en su composición, ya sea agua, hidrocarburos o materia orgánica de origen animal o vegetal. La extracción del hidrógeno conlleva un importante aporte de energía, que es menor cuanto mayor es el estado energético del compuesto. Entre las técnicas empleadas se encuentra el reformado de hidrocarburos por vapor que produce emisiones de CO<sub>2</sub> directas, aunque también puede aplicarse a productos de biomasa. Otra técnica consiste en la electrólisis del agua, en la que se producen emisiones indirectas, aunque cabe la posibilidad de emplear electricidad producida mediante energías renovables. Finalmente, existen otros procesos que se encuentran en fase de investigación, como la descomposición termoquímica del agua, la fotoconversión, o procesos fotobiológicos.

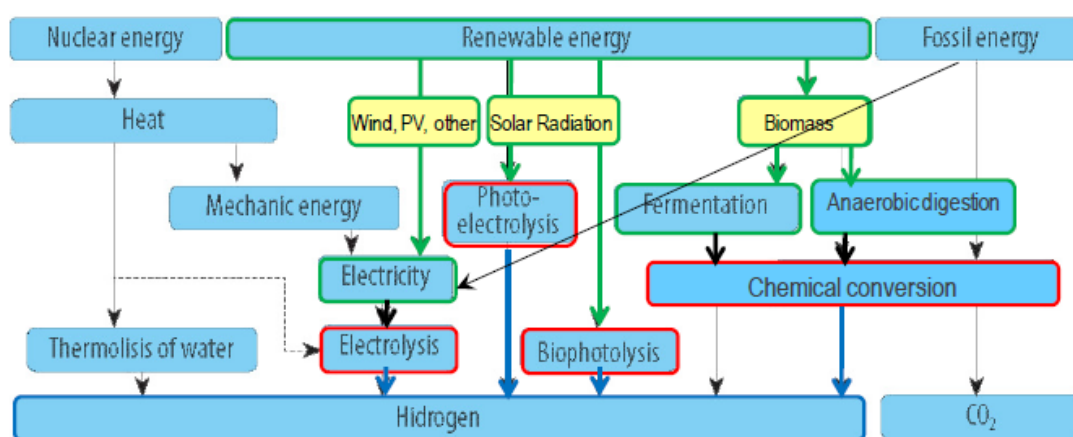


Figura 2.1: Procesos de producción de hidrógeno.

La producción puede llevarse a cabo en una planta centralizada o de forma descentralizada. En una planta centralizada, el coste del hidrógeno producido no es muy elevado, sin embargo, debido a su baja densidad energética, los costes de almacenamiento y transporte son elevados. Se espera que las primeras plantas de producción de hidrógeno sean descentralizadas, ya que la demanda inicial no sería

suficiente como para afrontar la inversión de una gran planta centralizada. El incremento del coste de la producción distribuida se compensa en cierta medida con la disminución del coste en transporte y distribución.

PROCESO	EFICIENCIA (%)	DISPONIBILIDAD	CENTRALIZADA/DESCENTRALIZADA	EMISIONES CO <sub>2</sub> (g CO <sub>2</sub> / kWh H <sub>2</sub> )	PRECIO (€/kWh H <sub>2</sub> )
Gas Natural (SMR sin CCS)	70-75	Ya disponible	Ambas	288-292	0.07-0.1
Gas Natural (SMR con CCS)	60	Medio Plazo	Centralizada	42.7	0.09-0.15
Gasificación Carbón (sin CCS)	50-60	Ya disponible	Centralizada	659	0.07
Gasificación Carbón (con CCS)	40-50	Medio Plazo	Centralizada	20.3	0.08
Gasificación Biomasa	56	Medio Plazo	Descentralizada (cerca del recurso)	0	0.07-0.08
Electrólisis (con Eólica)	65-70	Corto Plazo	Ambas	0	0.11-0.15
Electrólisis (con Red Eléctrica)	30	Ya disponible	Descentralizada	440	0.2
Ciclos Termoquímicos (Energía Solar)	30	Largo Plazo	Centralizada	0	0.18
Ciclos Termoquímicos (Energía Nuclear)	30	Largo Plazo	Centralizada	0	0.06

SMR: Steam Methane Reforming (Reformado con vapor de agua). CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage (Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> y almacenamiento).

Tabla 2.1: Eficiencia y coste de distintas tecnologías de producción de hidrógeno [9].

El reformado por vapor y la electrólisis para la producción de hidrógeno son procesos que ya están disponibles comercialmente y gracias a ello pueden desempeñar un papel clave a la hora de satisfacer la demanda energética de hidrógeno a corto y medio plazo. La cantidad de hidrógeno producida en la actualidad facilita la opción de introducirlo como combustible alternativo, aunque la mayoría se utiliza con fines industriales y no energéticos. Por lo tanto, para abastecer una demanda masiva sería necesario incrementar enormemente la producción actual.

Actualmente, el hidrógeno es más caro que los combustibles convencionales, pero en un futuro se espera que se pueda producir en Europa con costes por kilómetro de forma competitiva. Además de los ahorros en lo que a aspectos tecnológicos se refiere, ya sea en la producción, almacenamiento, o en las pilas de combustible, las políticas fiscales también pueden contribuir a hacer del hidrógeno un combustible competitivo.

## **2.2-Producción de hidrógeno mediante electrólisis**

La electrólisis consiste en la ruptura de la molécula de agua por acción de una corriente eléctrica, dando como productos hidrógeno y oxígeno. Dentro de los procesos de producción viables actualmente, es el único independiente del uso de combustibles fósiles. Entre las ventajas de este proceso se distingue la alta pureza del hidrógeno generado o la posibilidad de aplicarlo tanto a gran escala como a pequeña escala. Por contra, a causa de necesitar energía de alta calidad, su coste es muy alto en comparación con la producción a partir de combustibles fósiles, aunque existe un gran potencial de aplicación de forma barata, a partir del exceso de energía en centrales eólicas, hidráulicas, nucleares y fotovoltaicas.

El hidrógeno producido mediante electrólisis puede tratarse como una forma de almacenamiento de energía eléctrica en forma de gas, el cual puede volver a transformarse en energía eléctrica cuando sea preciso, solucionando la problemática que acarrea el almacenamiento de grandes cantidades de electricidad en baterías. Por ello, se podría aplicar en el aprovechamiento de los excedentes de producción de energía eléctrica, en especial en el caso de las renovables debido a su intermitencia.

### **2.2.1-Electrolizadores**

Al igual que las pilas de hidrógeno, las celdas electrolíticas se agrupan en serie para elevar la tensión de trabajo, formando una pila electrolítica o stack. El stack es el núcleo en el que tienen lugar las reacciones electroquímicas pero los electrolizadores incluyen otros elementos como el sistema de control de potencia, control de flujo de reactivos y productos, y elementos de seguridad.

La eficiencia de un electrolizador viene dada por la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de volumen de hidrógeno, expresado normalmente en kWh/Nm<sup>3</sup> o kWh/kg de hidrógeno. Por tanto, la eficiencia máxima de un electrolizador corresponderá al contenido energético del hidrógeno, 3,45 kWh/Nm<sup>3</sup> o 39 kWh/kg sobre el PCS, y 3 kWh/Nm<sup>3</sup> o 33 kWh/kg sobre el PCI. Los electrolizadores industriales trabajan con eficiencias de 4,2 hasta 6 kWh/Nm<sup>3</sup> lo que supone un 50-70% del PCI.

Los electrolizadores se pueden clasificar según su temperatura de operación y por su tipo de electrolito. Los electrolizadores de baja temperatura son los que funcionan por debajo de 150 °C. Se utilizan para la producción in situ en pequeñas cantidades y en ausencia de otro tipo de suministros, siendo muy adecuados para la integración con las energías renovables más desarrolladas como la eólica. Por otro lado, los de alta temperatura operan en el rango de 700-1000 °C. Gracias a la elevada temperatura, el electrolizador puede funcionar a voltajes más bajos, además del aumento del rendimiento de la reacción de electrólisis. Sin embargo, para llevar a cabo la electrólisis a alta temperatura es necesario disponer de vapor de agua y de una fuente térmica de alta temperatura, como la energía solar de concentración o la energía nuclear.

Según su electrolito, los electrolizadores tienen las siguientes características:

	<b>Alcalino</b>	<b>PEM</b>	<b>Óxido sólido</b>
<b>Presión de operación</b>	1-30 bar	< 200 bar	-
<b>Temperatura de operación</b>	< 100 °C	60-80 °C	700-1000 °C
<b>Eficiencia (PCI)</b>	50-60 %	55-70 %	85-90 %
<b>Capacidad de producción</b>	60 Nm <sup>3</sup> /h	10 Nm <sup>3</sup> /h	-
<b>Disponibilidad comercial</b>	Plena	Inmediata	A medio plazo

*Tabla 2.2: Características de los electrolizadores.*

### **2.2.2-Impacto ambiental**

La producción de hidrógeno se puede clasificar en tres fases: la construcción e instalación de la planta de producción, operación del proceso y el almacenamiento del gas producido. El principal problema medioambiental de la electrólisis para la producción de hidrógeno se encuentra en la fase de operación de la planta, debido a que la electricidad de la red para operar el electrolizador proviene mayormente de combustibles fósiles. Este impacto se puede minimizar utilizando electricidad proveniente de fuentes renovables. La contribución al potencial de calentamiento global (GWP) del electrolizador es relativamente pequeña, en torno al 4 %. La operación del mismo copa el 78%, mientras que el 18 % restante se debe a la compresión y almacenamiento del hidrógeno [10].

### **2.2.3-Costes de generación**

La mayoría del hidrógeno producido actualmente procede de grandes centrales de reformado por vapor, con un precio comprendido entre 1-3 \$/kg de hidrógeno, dependiendo fuertemente del precio del gas natural y de la capacidad de la planta, que está influenciada por la economía de escala [11]. Por ello, las plantas descentralizadas alcanzan costes de producción entorno a 6 \$/kg [12]. Lo mismo ocurre para los sistemas de generación mediante electrólisis.

El incremento del precio del gas natural y la bajada del precio de la electricidad podría desembocar en una producción descentralizada más rentable mediante grandes electrolizadores, los cuales se encuentran actualmente en desarrollo [13], sobre todo en un futuro dominado por fuentes de energía renovable intermitente. Actualmente, la baja producción de los electrolizadores requiere una gran inversión, por lo que la capacidad de utilización del sistema tiene un gran impacto en la rentabilidad del mismo. Por lo tanto, aplicaciones que demanden una producción continua de hidrógeno, como podría

ser el caso de una flota de vehículos propulsados con pila de combustible, ofrecerían un menor esfuerzo en la inversión inicial. Esta disminución en el precio de la generación de hidrógeno es más pronunciada en pequeños sistemas, de hasta un 34 % por kg de hidrógeno producido, debido a que su inversión y mantenimiento tienen mayor peso. Por otra parte, en grandes sistemas la reducción del precio no es tan significativa, en torno a un 9 %, haciendo atractiva su aplicación para aplicaciones con reducido tiempo de trabajo a plena carga, como es el caso de la integración de energías renovables.

A modo de ejemplo, en la figura 2.2 se desglosan los costes de generación de un electrolizador alcalino al 100 % de su capacidad. El coste más importante es el suministro de electricidad, que acapara el 75 % del total, lo que muestra la sensibilidad del precio del hidrógeno respecto al coste de la electricidad.

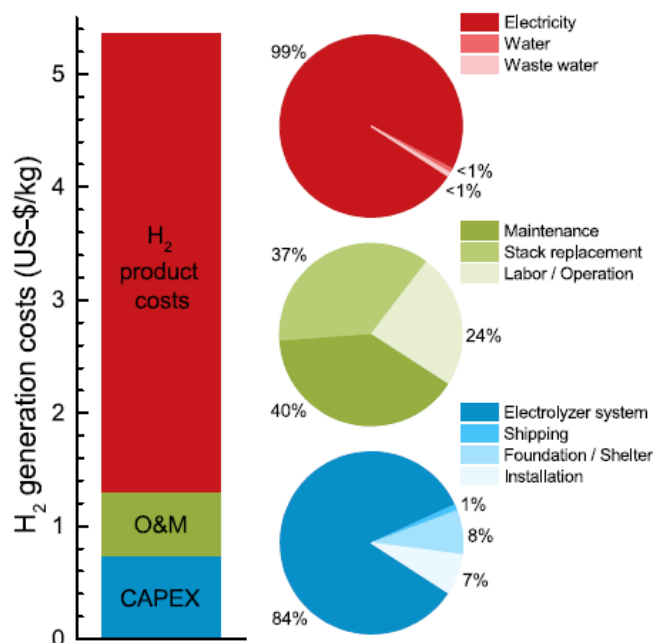


Figura 2.2: Costes de generación al 100 % de capacidad de utilización para un electrolizador alcalino.

### 2.3-Almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento de hidrógeno es un punto clave para su introducción en el mercado. El objetivo de un sistema de almacenamiento es aumentar la densidad del gas, de forma que se almacene la máxima cantidad posible de masa en el menor volumen. Como soluciones se encuentra la compresión del gas a altas presiones, su licuefacción en forma criogénica, o almacenar el hidrógeno dentro de un compuesto sólido mediante adsorción, que es la atracción de moléculas de una sustancia en la superficie de otra, o mediante absorción, que consiste en la atracción de moléculas de una sustancia en el interior de otra.

El hidrógeno en forma de gas comprimido es la tecnología más desarrollada y de menor coste, pero dada su baja densidad energética precisa de altas presiones de almacenamiento. El hidrógeno líquido tiene una alta densidad energética, pero debido a las bajas temperaturas de trabajo son necesarios materiales caros, además del alto coste energético para obtenerlo. El almacenamiento de hidrógeno en forma sólida es una tecnología prometedora que se encuentra en desarrollo, y que permite acumular grandes cantidades de hidrógeno a bajas presiones, a costa del aumento del peso del sistema.

En la siguiente tabla se muestra el estado actual de varias tecnologías de almacenamiento en cuanto a peso, volumen y coste. Como se puede observar, se deben llevar a cabo mejoras sustanciales para alcanzar los objetivos de rendimiento y seguridad establecidos, además de continuar con la disminución de peso, volumen y coste de estos sistemas, en especial para su aplicación en la automoción.

Tecnologías de almacenamiento	Peso (kWh/kg)	Volumen (kWh/l)	Coste (\$/kWh)
Hidruros químicos	1,6	1,4	8
Hidruros metálicos	0,8	0,6	16
Hidrógeno líquido	2,0	1,6	6
Hidrógeno comprimido (70 MPa)	1,9	1,3	16
Objetivos DOE (2015)	3,0	2,7	2

Tabla 2.3: Estado actual de varias tecnologías de almacenamiento de hidrógeno [14].



### 2.3.1-Almacenamiento energético de hidrógeno vs baterías

De gran interés resulta la comparación de diferentes tecnologías en términos de almacenamiento de energía y capacidad de manejo de potencia, como se muestra en la gráfica Ragone [15]. Las líneas continuas muestran el estado actual de las tecnologías y la discontinua el desarrollo futuro. Las líneas inclinadas indican la proporción entre la densidad de potencia y la densidad de energía, que permite informar sobre sus tiempos relativos de carga/descarga.

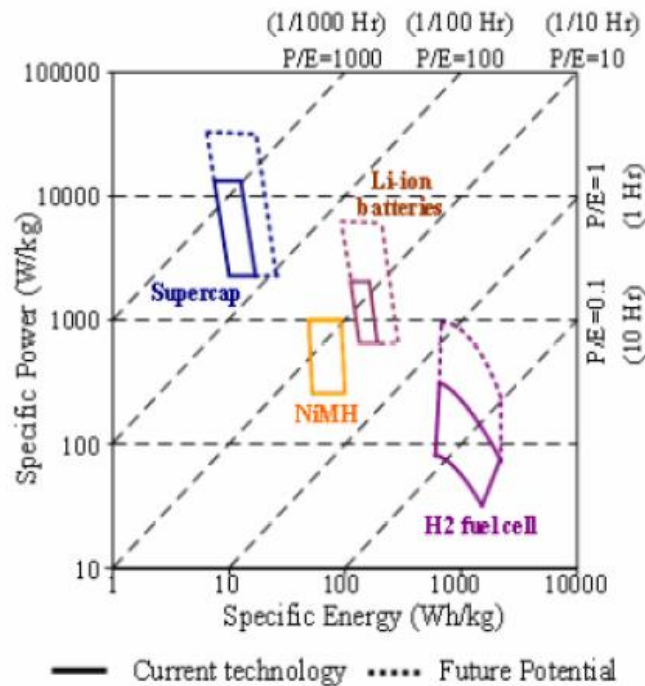


Figura 2.3: Gráfica Ragone de distintos métodos de almacenamiento de energía.

Las pilas de combustible que emplean hidrógeno tienen una elevada densidad de energía, debido a las características del gas y puede generar una elevada potencia durante largos periodos de tiempo, pero tiene una respuesta dinámica pobre debido a la velocidad de las reacciones electroquímicas internas. Por lo tanto ninguna de estas tecnologías cumple por sí sola las necesidades de los vehículos de propulsión eléctrica. Teniendo en cuenta la necesidad de gran autonomía, repostaje rápido y la capacidad de hacer frente a los cambios rápidos en la demanda de potencia, y la capacidad de aprovechar la energía del frenado, la combinación de pilas de combustible y supercondensadores/baterías obtiene ventaja frente a otras tecnologías y consigue mejores rendimientos que los que tienen los sistemas con motores de combustión interna.

A continuación, se muestra una tabla que resume el estado del arte del almacenamiento energético en baterías [16]:

	<b>Pb-ácido</b>	<b>Ni-MH</b>	<b>Ni-Cd</b>	<b>Li-Po</b>	<b>Li-Fe</b>
<b>Energía específica (Wh/kg)</b>	34	63,5	40	140	100
<b>Densidad energética (Wh/l)</b>	92	223	95	243	171
<b>Potencia específica (W/kg)</b>	1720	161	123	1950	3000
<b>Rendimiento (%)</b>	80	70	75	99	90
<b>Ciclo de vida (nº de ciclos)</b>	300	1500	500	1500	2500
<b>Coste (€/kWh)</b>	150	325	300	300	450

*Tabla 2.4: Estado del arte de las baterías.*

En términos de almacenamiento energético, el hidrógeno es capaz de alcanzar una energía específica hasta 20 veces mayor, una densidad energética 7,5 veces mayor con un coste 33 veces menor comparado con el almacenamiento en baterías. Si bien el rendimiento de licuefacción del hidrógeno se sitúa en 60-70 %, el hidrógeno comprimido a 700 bar tiene un rendimiento del 81-88 %, superior a la eficiencia de la mayoría de las baterías.

La comparación anterior se limita únicamente al estado de almacenamiento energético. Si se tiene en cuenta el coste y rendimiento del proceso de generación de hidrógeno y su posterior transformación en electricidad mediante una pila de combustible, el rendimiento del proceso puede caer hasta el 35 % y el coste aumentaría proporcionalmente, debido a que para obtener un kWh eléctrico final habría que generar el triple de energía en forma de hidrógeno.

Por tanto, la elección de un sistema u otro para el almacenamiento energético depende de su aplicación, especialmente de la cantidad de energía que se necesite almacenar. Las baterías son más adecuadas para menores cantidades de energía, mientras que almacenar energía en forma de hidrógeno lo será para almacenar grandes cantidades.

## **2.4-Pilas de combustible**

Las pilas de combustible son unos dispositivos electroquímicos que convierten directamente la energía química de un combustible en electricidad. A diferencia de las baterías, que son dispositivos de almacenamiento de energía, las pilas de combustible proporcionan energía de manera continua mientras se mantenga el suministro de reactivos.

En las pilas que utilizan hidrógeno como combustible y oxígeno como oxidante los únicos subproductos son el calor y el agua generados en las reacciones electroquímicas. Además al no existir combustión y carecer de partes móviles, las pilas de combustibles son muy eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Gracias a estas características, estos dispositivos se han convertido en serios candidatos para sustituir a los motores de combustión interna, sobre todo gracias a su baja temperatura de trabajo lo cual reduce las pérdidas por calor. También se está extendiendo su uso en aplicaciones de generación remota de energía, sustituyendo a las baterías convencionales.

Existen diferentes clases de pilas de combustible según el tipo de electrolito utilizado, ya sea sólido o líquido. La naturaleza del electrolito les confiere diferentes pautas de funcionamiento y características, como puede ser la temperatura de operación, los gases reactantes, los materiales para su construcción, o incluso su vida útil y el área de aplicación.

Entre todas ellas, las pilas poliméricas son actualmente la opción más prometedora debido a su alta eficiencia, densidad de corriente y baja temperatura de operación. Existen múltiples campos de aplicación, entre los que se encuentran la generación distribuida, su uso en medios de transporte o en aplicaciones portátiles.

### **2.4.1-Pilas de combustible de membrana polimérica**

Las pilas de combustible de tipo PEM ofrecen una elevada densidad de potencia por unidad de peso y volumen en comparación con otros tipos de pilas. El electrolito utilizado es una membrana fabricada con un polímero sólido conductora de protones. Los electrodos están compuestos por finas capas de carbón poroso que contienen platino como catalizador. Estas pilas sólo necesitan ser alimentadas con hidrógeno y oxígeno (o aire) para operar, generando agua y calor como únicos subproductos.

Existen dos tipos de PEMFC según su temperatura de operación, las de baja temperatura y las de alta temperatura. En las primeras la temperatura de operación es relativamente baja (40-80 °C), lo que favorece un arranque más rápido y una durabilidad mayor de sus componentes. Sin embargo a estas temperaturas el catalizador necesario para separar los protones y los electrones debe ser un metal noble, normalmente platino,

lo que aumenta considerablemente el coste global del sistema. Además el platino es extremadamente sensible al envenenamiento por CO, por lo que es necesario un pretratamiento para reducir su contenido en el combustible, incrementando el coste de operación.

El aumento de la temperatura de trabajo por encima de los 100°C facilita la reacción electroquímica, y al mismo tiempo simplifica la gestión del agua y del calor. También se abaratan costes gracias al uso de membranas híbridas basadas en una matriz polimérica con elementos dopantes, así como catalizadores con baja carga de platino. El grado de envenenamiento por CO del catalizador se reduce aumentando la vida útil de la membrana.

#### 2.4.2-Potencial de la celda y curva de polarización

En la siguiente figura se muestra las proporciones entre los tres tipos de pérdidas en una pila de combustible: por activación, por transporte de masa y por pérdidas óhmicas. Las pérdidas por activación son sin duda las mayores a cualquier nivel de densidad de corriente.

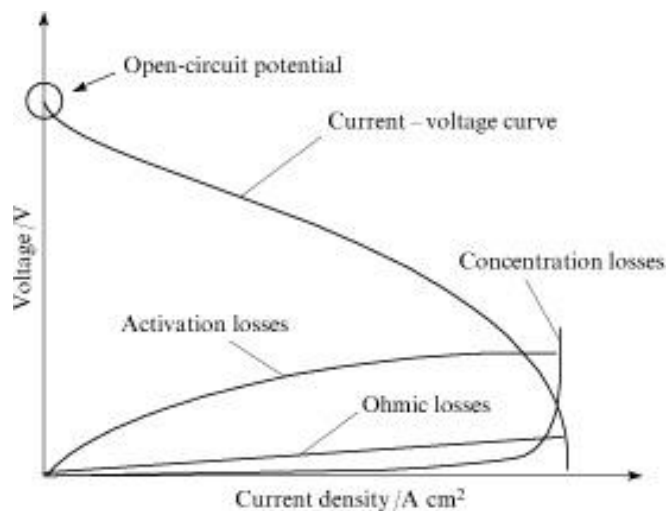


Figura 2.4: Pérdidas de voltaje en la pila de combustible.

El efecto de todas estas pérdidas se puede apreciar en una gráfica V-I, conocida como curva de polarización de la pila. Conocida la curva de polarización, se puede calcular la potencia generada, que dependerá del voltaje y la carga externa a la que esté conectada. Esta curva de potencia tiene un máximo, por lo que la zona de trabajo del dispositivo se situará justo antes de este máximo para evitar entrar en la zona de pérdidas por concentración de masa. La curva de polarización resulta de restar las pérdidas de activación, las pérdidas óhmicas y las pérdidas por concentración del potencial de equilibrio.

### 2.4.3-Eficiencia de una pila de combustible

La eficiencia de una pila de combustible es el ratio entre la energía eléctrica producida y el consumo de hidrógeno. Otra forma de obtener el rendimiento directamente a partir del potencial de la celda es:

$$\eta = \frac{V}{1,482} \eta_{fu} \quad (2.1)$$

Donde  $\eta_{fu}$  es la utilización del combustible, es decir, el hidrógeno consumido frente al suministrado, mientras que el valor 1,482 V es la diferencia de potencial que se obtendría si toda la entalpía del hidrógeno se convirtiese en electricidad, en referencia al PCS. Pilas de combustible bien diseñadas pueden alcanzar rendimientos de utilización del hidrógeno entre el 83% y el 85% con reformado, y hasta el 90% trabajando con gas puro [17]. En cualquier caso, el rendimiento de stacks empleados en aplicaciones prácticas es siempre menor del 50 % para el punto de funcionamiento nominal.

### 2.5-Vehículos eléctricos

Para lograr el objetivo de reducir en un 80 % los gases de efecto invernadero por debajo de los niveles de 1990, y eliminar la dependencia energética, la mayor parte de los vehículos deben convertirse a la propulsión eléctrica. La propulsión eléctrica se puede lograr por medio de baterías, o mediante una combinación de baterías (o supercondensadores) y pilas de combustible. Una característica común en los vehículos eléctricos es el aprovechamiento de la energía de frenada, que se utiliza para cargar las baterías, haciendo más eficiente el vehículo, especialmente al conducir por ciudad.

En las siguientes tablas se comparan 4 tipos de vehículos en varios términos. Los modelos seleccionados son vehículos representativos dentro de su clase, siendo los más avanzados en cuanto a tecnología [18].

	ICE (VW GOLF 1.4TSI)	Hybrid (Toyota Prius III)	BEV (Nissan Leaf)	FCEV (Honda FCX Clarity)
Power supply	IC engine	ICE, electric motor	Battery and electric motor	PEM fuel cells and electric motor
Fuel	Petrol, diesel and alternative fuel	Petrol/diesel as main fuel	'Electricity'	Hydrogen
Top speed (mph)	124	112	94	100
Acceleration (s)	9.5	10.4	7	10
Range (miles)	552	716	73-109	240
Purchasing price	\$29,400	\$33,400	\$41,250 (including \$8,000 government incentive)	\$80,000 (estimated)
Running fuel price (per mile)	\$0.22	\$0.14	From \$0.02	From \$0.07
Fuel economy (mpg or mpg equivalent)	45.6	72.4	99	81
Tailpipe CO <sub>2</sub> Emission (g/km)	144	89	0	0

*Tabla 2.5: Comparación de las especificaciones de los vehículos desde la perspectiva del cliente.*

Como se muestra, el coche eléctrico cuenta actualmente con más ventajas respecto al vehículo de hidrógeno en el mercado mundial, principalmente gracias a su bajo coste por kilómetro recorrido y el precio del vehículo. Aunque por contra, la autonomía sigue siendo su gran hándicap.

Para competir con los vehículos convencionales en términos de densidad energética útil, y que se logre ofrecer una autonomía similar, las baterías necesitan aumentar 5 veces la capacidad actual, mientras que el hidrógeno sólo necesita una mejora del 30 %. El hidrógeno tiene mayor potencial para conseguir este objetivo gracias al desarrollo de los tanques de almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido. Las baterías necesitarían alcanzar 666 Wh/kg, lo que es bastante improbable lograr mediante baterías de Li-ion, cuyo desarrollo ya se ha optimizado hasta sus límites prácticos [19]. Otras alternativas de baterías de litio, como litio-metal, litio-azufre o litio-aire están desarrollándose actualmente, llegando a niveles de energía específica de casi 500 Wh/kg [20].

### **2.5.1-Vehículos con pila de combustible**

La mayoría de fabricantes de vehículos cuentan con programas de investigación y desarrollo enfocados hacia los vehículos propulsados con pila de hidrógeno. Esta tecnología ha progresado en la última década en cuanto a reducción de costes y al aumento de la vida útil. Sin embargo, la reducción de costes debe continuar a la baja, principalmente en la producción de pilas de hidrógeno. Se deben mejorar los sistemas de almacenamiento, así como el desarrollo de una infraestructura de abastecimiento de hidrógeno, en especial de hidrógeno producido a partir de fuentes renovables. Por otra parte, la sociedad debe concienciarse con respecto al hidrógeno y sus tecnologías a través de una mayor divulgación y educación. Por último, las normas de seguridad y los estándares de producción deben ser revisados para reflejar la situación actual. Por lo tanto, actualmente, existe una gran incertidumbre sobre el ritmo de adecuación al mercado de hidrógeno, lo que repercute negativamente en las fuertes inversiones necesarias para su incorporación al uso generalizado.

Las pilas de combustible utilizadas en aplicaciones de transporte son de tipo PEM. Para estas aplicaciones, es necesario que la pila se combine con un sistema alternativo de almacenamiento de energía, normalmente baterías, para que la pila proporcione la energía primaria y la batería absorba los picos de potencia.

En la actualidad no existe aún a nivel mundial un mercado consolidado de hidrógeno, y el desarrollo de vehículos con pila de combustible está limitado a prototipos, aunque existen algunos modelos comerciales de pilas de hidrógeno para el sector del transporte [21], como se muestra en la siguiente tabla.

<b>Fabricante</b>	<b>Nombre del producto</b>	<b>Tipo</b>	<b>Potencia generada</b>
<b>Ballard</b>	FCvelocity-HD6	PEM	75 y 150 kW
<b>Hydrogenics</b>	Hypm HD Modules	PEM	4,8,12,16,33 y 100 kW
<b>Nuvera</b>	Andromeda Fuel Cell Stack	PEM	100 kW
	HDL-82 Power Module	PEM	82 kW
<b>UTC Power</b>	PureMotion 120	PEM	120 kw

*Tabla 2.6: Pilas de combustible comerciales para el sector del transporte.*





# 3-Diseño y montaje de una hidrogenera en una instalación aislada

---

## 3.1-Descripción y características de la instalación aislada

Las necesidades energéticas de sistemas aislados en entornos rurales se pueden satisfacer de manera eficaz y competitiva con el uso de energías renovables. El objetivo del proyecto "*Profitable Small Scale Renewable Energy Systems in Agrifood Industry and Rural Areas: Demonstration in the Wine Sector*" LIFE+REWIND es que la demanda energética de una instalación vitivinícola de Viñas del Vero, concretamente unos bombeos para depuración y riego, se cubra mediante la energía proveniente de unos paneles solares. Esta instalación, como sucede también en muchas otras actividades agropecuarias con un sistema aislado, tiene un marcado carácter estacional o temporal, lo que se refleja en demandas energéticas muy variables en el tiempo.

El diseño óptimo de los sistemas renovables de producción energética atiende a las necesidades en los periodos de mayor demanda, lo que provoca un excedente de energía el resto del tiempo. Mediante un sistema de baterías se puede administrar una cantidad limitada, que permite equilibrar consumos a lo largo del día o un tiempo algo mayor, pero su coste es prohibitivo para almacenar excesos sostenidos en el tiempo. Por ello en el proyecto se va a implementar una alternativa adecuada para el almacenamiento a largo plazo, consistente en uso de hidrógeno como vector energético.

La energía excedentaria se va a emplear para generar hidrógeno mediante electrólisis, el cual será almacenado en depósitos a presión. Posteriormente un sistema de pilas de combustible reconvertirá en electricidad el hidrógeno acumulado para su aprovechamiento. En este caso, utilizando el hidrógeno para reemplazar otro consumo relevante de la explotación: el gasóleo para movilidad y maquinaria agrícola. En particular, se ha propuesto su uso en un vehículo eléctrico de uso agrícola el cual será adaptado para propulsarse mediante una pila de combustible. De esta forma, se podrán sustituir los combustibles fósiles en las explotaciones agrarias y se llevará a cabo el tránsito hacia explotaciones energéticamente independientes.

### 3.1.1-Ubicación

La instalación del proyecto se encuentra en la bodega de Viñas del Vero, de la Denominación de Origen Somontano, en Barbastro (Huesca). La instalación aislada va a alimentar con energía renovable un sistema de riego por goteo, cuyo aporte hídrico procede del agua utilizada en los procesos de bodega, previamente depurada en la propia Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR).



*Figura 3.1: Ubicación de Viñas del Vero.*



*Figura 3.2: Balsa de riego y EDAR.*

### 3.1.2-Recursos renovables

La cantidad de recurso solar se ha obtenido a partir de PVGIS [22]:

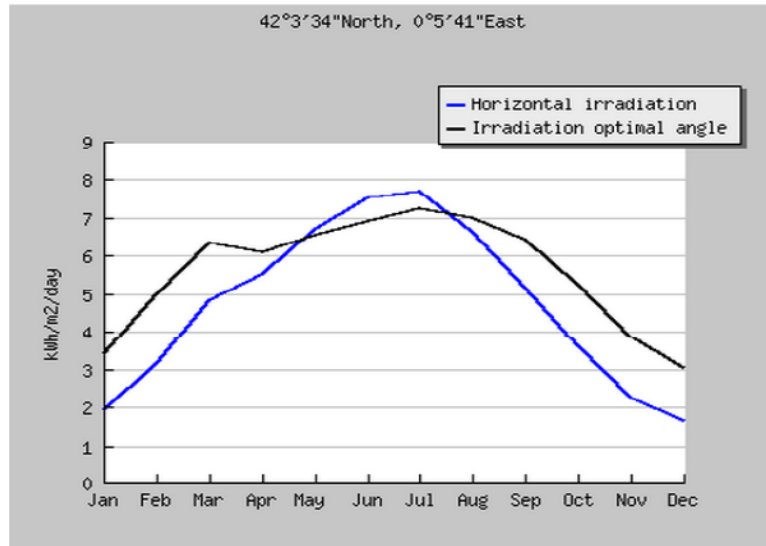


Figura 3.3: Irradiación a lo largo del año.

En cuanto a los datos obtenidos durante la campaña de medición in situ, se muestra el perfil anual del recurso medido, donde se observan variaciones de un año a otro poco significativas.

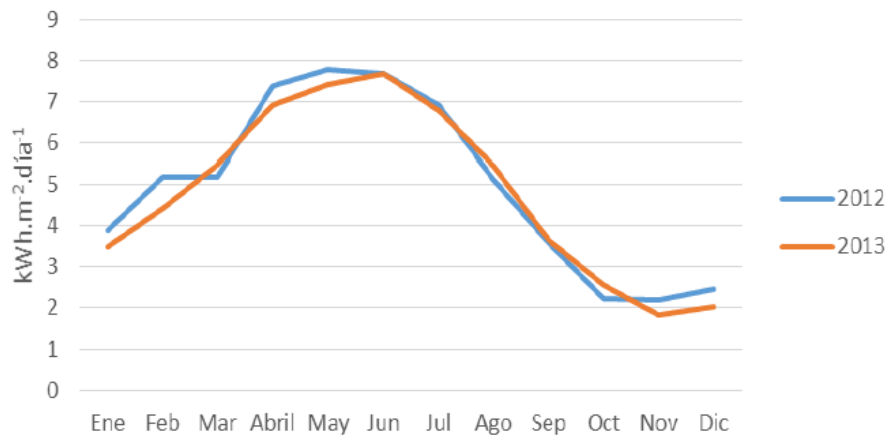


Figura 3.4: Irradiación media diaria mensual medida in situ.

### 3.1.3-Dimensionado de la instalación

El sistema de bombeo para el que se ha diseñado el sistema de generación fotovoltaico está compuesto por 3 bombas, cada una de las cuáles debe bombear en la temporada de riego 10.000 m<sup>3</sup> de agua, lo que supone un gasto energético de 8.310 kWh, de los cuales 3.900 kWh corresponden a bombeos de riego y 4.410 kWh a la elevación de agua. El período de riego está comprendido entre el 16 mayo y el 15 de septiembre, por lo que este consumo se realiza durante 123 días al año. Esta temporalidad de la demanda es una característica clave de los sistemas de bombeo para riego de cultivos mediterráneos. Para operar el riego durante la temporada se suelen establecer criterios de riego semanal, accionando unos días el bombeo de riego, otros los bombeos de elevación y otros ninguno. Gracias a la existencia de una balsa para la acumulación de agua y dos bombeos diferenciados, aunque dependientes entre ellos, existe un cierto grado de libertad en el funcionamiento del sistema de riego. Esto se traduce en una demanda hasta cierto punto gestionable, lo que resulta en una mayor facilidad para consumir la energía disponible en el momento de su producción.

El dimensionado de sistemas de generación renovable aislada se enfrenta al problema de que la producción no es apenas gestionable, ya que depende del valor del recurso en cada momento. Por ello resulta necesaria la acumulación de energía, generalmente en baterías. Aun así, la cantidad de energía acumulable es limitada, ya que a la variabilidad del recurso se suma la de la demanda. Por lo tanto, si el sistema se sobredimensiona para cubrir totalmente la demanda de energía, habrá muchos momentos en que exista un excedente de energía que no pueda ser utilizada ni acumulada en las baterías, cuyo desaprovechamiento penaliza la eficiencia y rentabilidad del sistema. En el caso de los riegos, cuya demanda se limita a una temporada cada año, puede haber muchos meses en los cuáles toda la energía producida sea excedentaria.

Esta es una de las dificultades para alimentar los bombeos de riego con sistemas renovables aislados de forma económicamente viable. Una solución al problema de la energía excedentaria consiste en no sobredimensionar la generación renovable y añadir un generador diesel, el cual entraría en funcionamiento solamente cuando la generación renovable y la energía acumulada en las baterías fuesen insuficientes para satisfacer la demanda. Si el sistema está bien diseñado, esta solución guarda un buen compromiso entre la economía y la sostenibilidad.

Sin embargo, una opción que no incluya el uso de combustibles fósiles es la instalación de un sistema de generación renovable de hidrógeno a partir del excedente de energía, que puede almacenarse o transportarse para recuperar esa energía en el momento o lugar donde pueda ser útil. Esta es la opción elegida para el prototipo de este proyecto, en el cual la energía excedentaria se dedicará a producir hidrógeno para alimentar un vehículo eléctrico todoterreno de la explotación.

La demanda de energía para producir hidrógeno no está considerada como un parámetro básico del dimensionado de la instalación. Esto se debe a que el hidrógeno se va a destinar a sustituir el gasóleo en la maquinaria y movilidad de la explotación, y dado su carácter demostrativo, va a ser una sustitución parcial. Así, se considera que la demanda de energía para los bombeos de riego y elevación es la que tiene prioridad para el diseño.

### 3.1.4-Diseño de la instalación fotovoltaica

Se han instalado 80 paneles flotantes de 275 Wp y de 265 Wp. La potencia total del campo de captación es de 21.600 Wp, con una orientación de  $-30^\circ$ , es decir en dirección sur-sureste. La inclinación de dichos paneles es de  $5^\circ$  para maximizar la producción durante el periodo estival. La producción anual prevista para este parque fotovoltaico es de 29.100 kWh.

Fixed system: inclination=5 deg., orientation=-30 deg.				
Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	36.50	1130	2.15	66.6
Feb	58.40	1640	3.42	95.7
Mar	85.70	2660	5.09	158
Apr	94.20	2830	5.68	170
May	110.00	3400	6.80	211
Jun	119.00	3580	7.58	227
Jul	121.00	3750	7.76	240
Aug	106.00	3290	6.80	211
Sep	86.90	2610	5.41	162
Oct	63.40	1970	3.85	120
Nov	41.80	1250	2.49	74.8
Dec	31.10	965	1.85	57.3
Year	79.60	2420	4.91	149
Total for year		29100		1790

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

*Tabla 3.1: Producción fotovoltaica mensual [22].*

Para la elección de las baterías, dado que en esta aplicación estacionaria no es importante el peso ni el volumen, se ha escogido una tecnología de plomo-ácido, con una buena relación entre coste y energía. Cada batería está formada por 24 vasos en serie sumando 48 V. La capacidad de cada vaso es de 2.680 Ah C10 y la energía acumulable total es de 128.640 Wh.



*Figura 3.5: Baterías.*

### **3.2-Instalación de generación y almacenamiento de hidrógeno**

Como se ha expuesto anteriormente, el diseño de la instalación requiere un sistema para el almacenamiento energético a largo plazo, por lo que la energía excedentaria se va a emplear para generar hidrógeno mediante electrólisis, almacenándolo en botellas a presión. En el diseño del sistema de generación de hidrógeno se han considerado principalmente elementos comerciales para minimizar los costes y asegurar la fiabilidad de la instalación en los términos especificados por los fabricantes. Adicionalmente, para el correcto funcionamiento del conjunto se debe diseñar un sistema para el suministro de los equipos, un sistema de circulación de gases, así como elementos de control y seguridad.

El sistema se compone de un equipo de purificación de agua de red que produce agua de tipo II, un electrolizador alcalino con membrana, una etapa de almacenamiento intermedia de baja presión, un compresor de membrana metálica y un rack de bombonas de alta presión que sirve como depósito estacionario de hidrógeno.

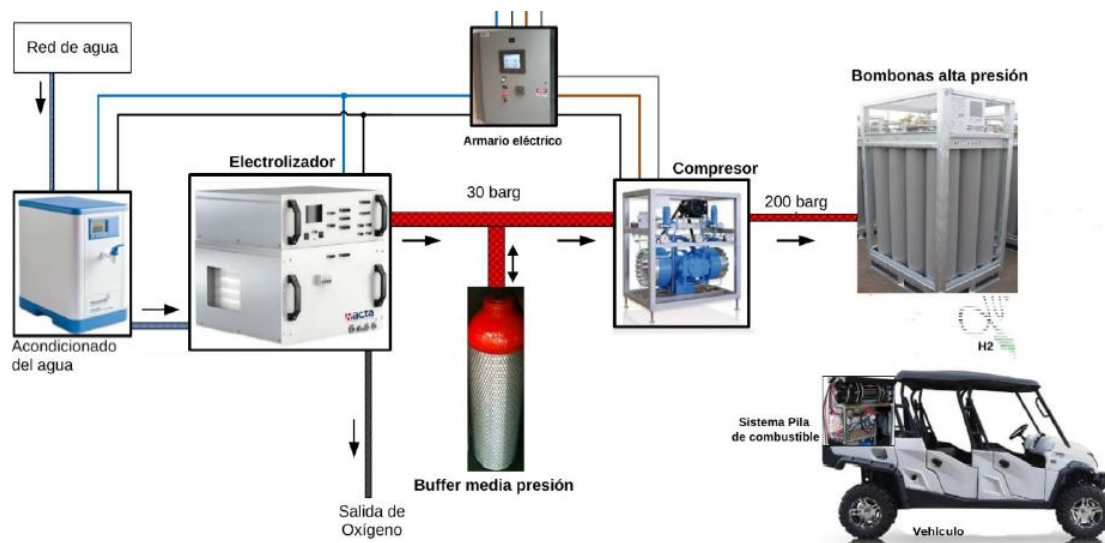


Figura 3.6: Esquema general del sistema de generación de hidrógeno.

El funcionamiento básico de la planta se resume en los siguientes pasos:

1. El agua de la red se pasa a través de un sistema combinado de purificación mediante ósmosis inversa y desionización para obtener agua con una conductividad por debajo de  $5\mu\text{S}/\text{cm}$  que sirve de fuente para la producción de hidrógeno.
2. Esta agua llega al electrolizador, que está alimentado por la energía eléctrica excedentaria de la instalación fotovoltaica. Se ha escogido un electrolizador de tecnología alcalina con una membrana que evita la mezcla de los productos. Su producción se ajusta a las necesidades relativamente pequeñas de la explotación de Viñas del Vero, 500 NI/h. El electrolizador descompone el agua entrante en oxígeno, que se ventea a la atmósfera, y en hidrógeno. El hidrógeno generado pasa por un sistema de secado para hacerlo apto para el uso de pilas de combustible y sale del electrolizador a una presión de 30 bar.
3. El gas se almacena en un pequeño depósito que sirve de buffer del que se alimenta un compresor de membrana metálica. El propósito del buffer es evitar bombeos en vacío del compresor.
4. El gas sale del compresor a una presión de 200 bar y se almacena en un rack de 12 bombonas de 50 l.
5. De este depósito se alimenta el vehículo de hidrógeno, que puede repostarse mediante un sistema comercial estandarizado, o mediante un sistema manual auxiliar.

### **3.2.2-Dimensionado de la instalación**

Las capacidades y características de los elementos del sistema se han elegido de acuerdo a las estimaciones de producción y uso de energía solar durante el año. El propósito de la instalación de generación de hidrógeno es el almacenamiento de los excedentes energéticos a medio/largo plazo mientras que las baterías cubren las necesidades de gestión y almacenamiento a corto plazo.

Esta energía excedentaria almacenada en forma de hidrógeno se utilizará para el repostaje de un vehículo eléctrico agrícola adaptado para propulsarse híbridamente mediante baterías y una pila de combustible de membrana polimérica. Una carga completa del vehículo, para un uso aproximado de 5 horas diarias, requiere una entrada de 11,4 kWh para baterías y unos 41,5 kWh para generación de hidrógeno.

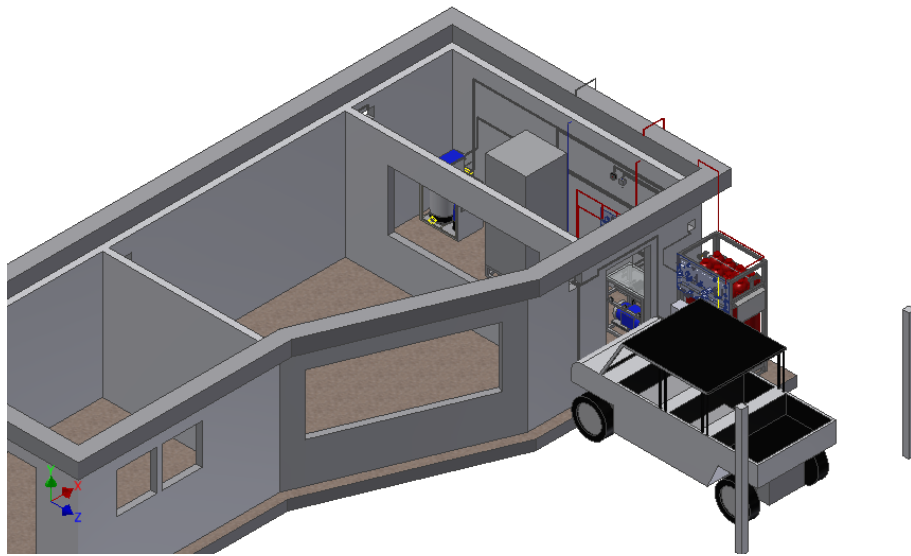
El sistema de paneles solares, una vez satisfechas las necesidades de bombeo de agua, deja como remanente, durante los 4 meses de época de riego, unos 5.318 kWh y en los restantes 8 meses unos 15.450 kWh, en total 20768 kWh. Esto supone una energía disponible para el vehículo para 392 días al año. Lógicamente, lo que esté por encima de 365 no cuenta, así que la energía extra disponible se destinará para los aireadores de la balsa de la EDAR. El rack se ha dimensionado para permitir un almacenamiento teórico de 16 días de consumo de hidrógeno.

### **3.2.3-Diseño de la hidrogenera**

Los equipos de la instalación de generación de hidrógeno se sitúan dentro de una caseta climatizada construida a tal efecto, exceptuando el rack de bombonas que se ha emplazado en el exterior debido a la gran cantidad de hidrógeno que almacena, por lo que en caso de fuga el gas se dispersará rápidamente en el ambiente.

El interior de la caseta está dividido en dos habitaciones independientes, a las cuales se accede por distintas puertas y únicamente se encuentran comunicadas visualmente mediante una gran mampara de vidrio doble. En la sala más grande, aparte de situarse el banco de baterías y los inversores solares, se encuentra el ordenador de mando que permite controlar mediante una pantalla táctil toda la instalación. A esta sala podrán acceder las visitas pertinentes para poder visualizar la hidrogenera a través de la mampara, mientras que a la habitación donde se encuentran los sistemas de purificación de agua, electrólisis y compresión de hidrógeno únicamente se podrá acceder por motivos técnicos, ya que se considera un espacio ATEX (atmósfera explosiva).





*Figura 3.7: Interior de la caseta.*

Desde el armario eléctrico general situado en la habitación de las baterías, se distribuyen los tubos que contienen tanto los cables para alimentar los distintos equipos, como los cables de los diferentes sensores y dispositivos para el control de la instalación. Todos los cables van por el interior de un tubo corrugado especial que cumple las normativas ATEX, y las conexiones a los equipos igualmente se realizan mediante prensaestopas adecuadas para dicha atmósfera.

En el fondo de la habitación se encuentra la purificadora de agua apta para trabajar en atmósferas ATEX, a la cual llega una toma de agua de red para alimentar el equipo. De ella salen dos conductos, uno para suministrar agua de tipo II al electrolizador, controlado mediante una electroválvula, y otro que conduce hasta un desagüe situado detrás del electrolizador.

En el centro de la habitación se encuentra el electrolizador, al que llega el agua del sistema de purificación (refilling). Todas sus conexiones se realizan por la parte posterior. Tanto la conexión para vaciar el tanque mediante una válvula manual como la salida de agua de sobrellenado del depósito se conectan directamente al desagüe. Existe otra salida por donde se expulsa el oxígeno generado por el electrolizador, el cual puede contener agua igualmente, por lo que se circula a través de un sifón que separa ambos elementos. El oxígeno se circula al exterior mediante una línea de venteo mientras que el agua se conduce al desagüe. Finalmente hay dos salidas de hidrógeno, una de producción y otra de venteo.

El hidrógeno generado a 30 bar se conduce a un panel en el que se sitúan las conexiones a una botella de 10 litros que actúa como buffer y al compresor. En él se encuentran dos manómetros para conocer la presión del hidrógeno separados por una electroválvula que controla el flujo de hidrógeno entre el electrolizador/botella buffer y el compresor, así

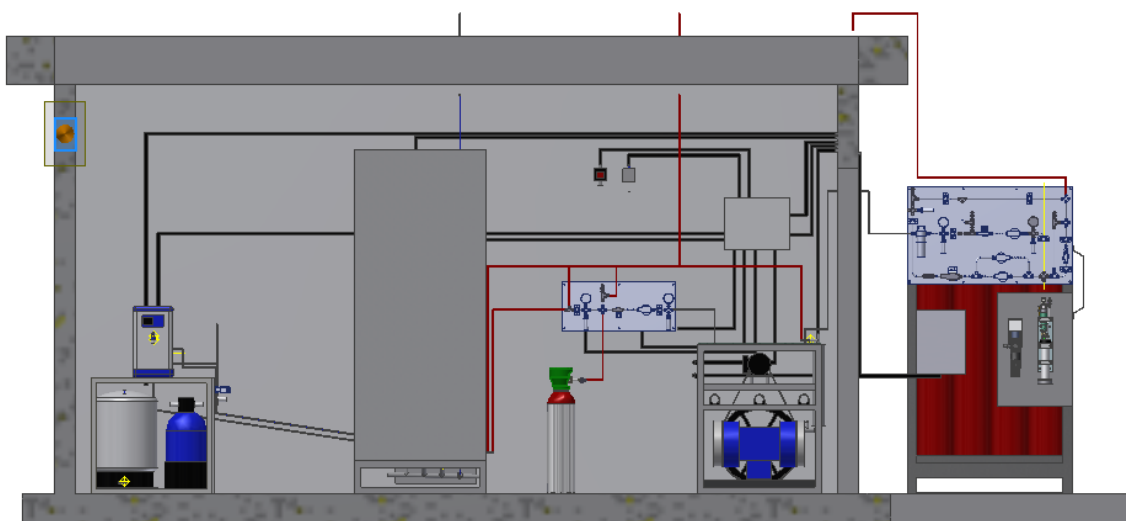
como una llave manual de paso. Además incluye una válvula de sobrepresión y otra manual que conducen a la línea de venteo de baja presión de hidrógeno.



*Figura 3.8: Panel de distribución de hidrógeno.*

El hidrógeno llega al compresor donde se eleva su presión hasta los 200 bar, y posteriormente se conduce al exterior de la caseta para almacenarse en el rack de bombonas. En el compresor hay una conexión a la línea de purga en caso de rotura de la membrana. Finalmente en el interior de la caseta se sitúan un sensor de temperatura y el sistema de climatización tipo "inverter" para evitar problemas de congelación en invierno y el calentamiento excesivo en verano, así como un sensor de hidrógeno y un ventilador que expulsa el hidrógeno al exterior en caso de que se detecte una fuga, además de un fluorescente para iluminar la habitación. Todos los elementos tienen certificación ATEX.

Por último el hidrógeno llega al rack de bombonas situado en el exterior de la caseta, donde pasa a través de un filtro antes de ser almacenado. Sobre el rack hay un panel que permite tanto la carga como la posterior descarga de las botellas mediante electroválvulas, así como manómetros, válvulas de sobrepresión y válvulas manuales protegidas mediante candados, ya que se encuentra a la intemperie. Incluye una válvula de sobrecarga que en caso de fallo liberaría el hidrógeno contenido lentamente y de forma controlada a través de la línea de venteo de hidrógeno de alta presión. En el lateral de la estructura del rack también se encuentran los dos sistemas de dispensación de hidrógeno y un armario para controlar la recarga.



*Figura 3.9: Alzado de la hidrogenera.*

### 3.2.4-Equipos

A continuación se detallan las especificaciones de los componentes principales de la planta:

- **Sistema de purificación de agua:**

Se trata de un módulo Ecomatic 3L de la empresa Wasserlab. El equipo es capaz de producir agua tipo II a partir de agua de red. Su producción es de 3 l/h, generando un caudal de rechazo de 18 l/h. Trabaja a una presión de 4 bar, y solamente entra en funcionamiento cuando el depósito del electrolizador se encuentra por debajo de cierto nivel.



*Figura 3.10: ECOMATIC.*

- **Electrolizador**

Para la electrólisis de agua se ha adquirido un módulo EL500 de la empresa Acta (adquirida a Heliocentrics), capaz de producir 500 NI/h de hidrógeno con una presión de salida de 30 bar. Se trata de un equipo de electrólisis alcalina con una membrana que crea una barrera física entre los productos de la reacción. Opera a una temperatura de 45 °C, y tiene un consumo eléctrico de 2.390 W.

El agua se suministra desde un tanque auxiliar con una capacidad de 30 litros situado en la base del electrolizador, cuya temperatura no debe estar nunca por debajo de los 5 °C para evitar la congelación. Para que el agua sea conductora se mezcla con una disolución de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/KHCO<sub>3</sub> al 1%, que no es necesario reponer. Tiene un consumo de agua purificada de 0,4 l/hora, la cual debe tener una conductividad menor <10 µS/cm. Produce hidrógeno de una pureza del 99.94, que asciende al 99.99% después de pasar por el módulo de secado. Además, incluye un módulo electrónico que se encarga del control y del suministro de energía para el dispositivo, permitiendo además la comunicación del mismo mediante una interfaz web.



*Figura 3.11: Electrolizador.*

- **Compresor**

El compresor para hidrógeno es de diafragma metálico, modelo MV 6208 de la marca SERA, de bajo consumo y con una capacidad acorde a la instalación. Es capaz de comprimir 0,5 Nm<sup>3</sup>/h de hidrógeno, el mismo caudal producido por el electrolizador. También se adecua a la presión de salida de éste, ya que es capaz de comprimir hidrógeno con una presión de entrada comprendida entre 10-30 bar hasta 201 bar de presión de salida, con un consumo del motor eléctrico de 0,75 kW.

Técnicamente no posee fugas de hidrógeno hacia el exterior ni existe contaminación del gas a comprimir. Además está completamente protegido para evitar la generación de chispas que puedan causar la ignición en un ambiente rico en hidrógeno.



*Figura 3.12: Compresor de hidrógeno.*

- **Depósito estacionario de hidrógeno a alta presión**

El sistema de almacenamiento estacionario de hidrógeno está compuesto por un rack de 12 botellas de alta presión fabricado por la empresa Calvera S.L. Cada botella tiene una capacidad de 50 litros y puede almacenar hidrógeno a 200 bar, por lo que pueden almacenar en total 106 Nm<sup>3</sup> de hidrógeno, lo que equivale a 318 kWh.

En el propio rack de botellas se encuentra instalado el sistema de suministro de hidrógeno al vehículo fabricado por la empresa WEH específico para este gas. Además, se ha realizado la instalación de un sistema de control que permite conocer en todo momento la situación del repostaje, una conexión de venteo de seguridad para evacuar el hidrógeno a presión que pueda quedar en el interior de la manguera una vez realizado

el repostaje y un desenganche en caso de movimiento accidental del vehículo. Así mismo también existe la opción alternativa de recargar el vehículo manualmente a través de una manguera flexible la cual se rosca directamente al vehículo.

Para poder realizar la recarga se precisa de una llave que active el sistema. Una luz indica que el sistema está listo para la recarga. Una vez colocada la manguera se puede abrir la llave de paso que tiene en el cabezal (sólo se abre si está conectada a la boquilla de entrada de hidrógeno del vehículo) y el gas comenzará a fluir, indicándose mediante el encendido de otra luz. Finalmente cuando la presión se haya estabilizado significará que la recarga se ha finalizado, indicándose con otra señal luminosa. En el armario situado en el rack donde se encuentran las luces indicativas, hay colocada una seta de emergencia que permite la parada del repostaje en caso de accidente.



*Figura 3.13: Rack de bombonas y sistemas de suministro.*

### 3.2.5-Sistema de control y seguridad

El sistema de control, diseñado *ad hoc* para esta instalación en el LIFTEC, garantiza el funcionamiento en régimen óptimo y la correcta interacción de los distintos componentes de la instalación. Está orientado al uso racional de la energía, al mínimo desgaste de los equipos y a proporcionar la máxima seguridad para el sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno, así como del sistema eléctrico y la interacción entre ambos.

Las decisiones principales de control se refieren al encendido/apagado del purificador de agua, el electrolizador, el compresor y las electroválvulas del circuito de hidrógeno. Además el sistema opera en dos niveles generales, en modo normal y en modo emergencia. Por ejemplo, exige un tiempo mínimo de funcionamiento del electrolizador de 10 minutos, que evita bombeos en vacío y permite ajustar el acoplamiento entre el electrolizador, el buffer y el compresor para que el número de arranques y paradas sea mínimo. Todo el control de la instalación se realiza desde una pantalla táctil situada sobre el armario eléctrico de suministro en el interior de la sala de baterías, que además muestra información detallada y en tiempo real del estado de todas las variables de la instalación. Gracias a los distintos sensores, cualquier medición de un parámetro que exceda sus límites de seguridad disparará un apagado de emergencia para todos los componentes, además de contar con una seta de emergencia para parar el sistema en caso de accidente.

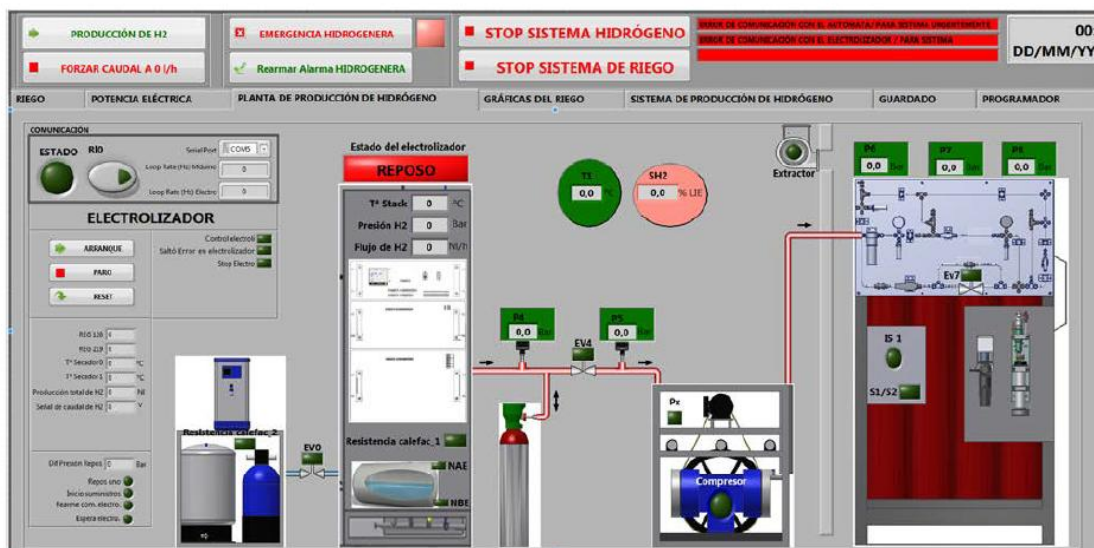


Figura 3.14: Imagen del programa de control.

Se han diseñado y construido sendos paneles para las zonas de baja (interior) y alta presión (exterior), un panel de suministro y un cuadro general de control. El panel de baja presión (que cumple con normas ATEX) asegura la continuidad del flujo de H<sub>2</sub> entre la salida del electrolizador y el compresor, pasando por la botella buffer a 30 Bar.

Está dotado de sensores, electroválvulas y medios visuales (manómetros) para la monitorización. Asimismo, el panel de alta presión regula el llenado del depósito estacionario después de la fase de presurización a 200 bar mientras que el panel de suministro sirve para la descarga final del hidrógeno almacenado hacia las bombonas del vehículo.

Por último se ha instalado un sensor de hidrógeno en el interior de la caseta que dispara una ventilación forzada de emergencia además de la parada de los equipos. En el monitor de control central se encuentra información detallada y en tiempo real del estado de todas las variables de la instalación.

Los esquemas de la instalación realizados con el programa VISIO, en los que se describe la instalación de generación de hidrógeno con todos sus componentes y conexiones, y el esquema de las conducciones eléctricas entre el armario general y los distintos componentes de la planta, se pueden ver en las figuras 3.23 y 3.24 en los anexos.



# 4-Diseño y montaje del sistema híbrido con pila PEM en un vehículo eléctrico comercial

---

En el presente tema se va a describir la adaptación efectuada en el vehículo, de tracción eléctrica, para la integración de la pila PEM alimentada con hidrógeno.

## 4.1-Descripción del vehículo

El vehículo eléctrico comercial que se ha empleado en este proyecto es un 4 plazas con tracción a las 4 ruedas modelo ePath 7500. Dispone de un motor eléctrico de 7,5 kW alimentado baterías que le permite alcanzar una velocidad máxima de 40 km/h. Según las especificaciones del fabricante, el vehículo tiene una autonomía de 100 km si se mantiene una velocidad constante de 30 km/h.



*Figura 4.1: Vehículo comercial eléctrico ePath 7000.*

El vehículo dispone en su parte frontal de un cabestrante eléctrico. Un enchufe permite su conexión a la red eléctrica para recargar las baterías, con un tiempo de recarga de 8

horas. En la parte trasera del vehículo hay una plataforma de carga tipo volquete que servirá como espacio para instalar la pila de hidrógeno y el sistema de almacenamiento de gases. Una vez realizada la modificación, el vehículo pasará de ser un BEV a un FC-PHEV basado en una pila de combustible.



*Figura 4.2: Volquete trasero del vehículo desmontado.*

El vehículo está dotado de 12 baterías de plomo-gel de 6 voltios colocadas en serie, que aportan un voltaje nominal de 72 V, con una capacidad total de almacenamiento de energía de 225 Ah, por lo que son capaces de almacenar 16,2 kWh. Una pequeña batería de 12 V se encarga de alimentar los sistemas auxiliares del vehículo, al igual que se hace en un coche convencional. El sistema de baterías está situado bajo los asientos traseros del vehículo, su peso total asciende a 376,8 kg y el volumen ocupado es de 160 litros. Por lo tanto, tiene una energía específica de 43 Wh/kg y una densidad energética de 101,5 Wh/l.

#### **4.2-PEMFC del vehículo**

Para generar electricidad a partir del hidrógeno generado por el exceso de energía de la instalación, se ha decidido instalar una pila H-3000 fabricada por la empresa Horizon, la cual tiene una potencia nominal de 3000 W y utiliza como reactantes hidrógeno y aire. En concreto, se ha seleccionado esta pila porque la filosofía del sistema de control a desarrollar es que la pila suministre el 30 % de la energía demandada por el vehículo. Se trata de una pila de cátodo abierto, por lo que el suministro de oxígeno se realiza directamente mediante aire atmosférico que actúa a su vez como refrigerante del stack. Para tal propósito la pila tiene integrados 4 ventiladores que fuerzan la circulación del aire.

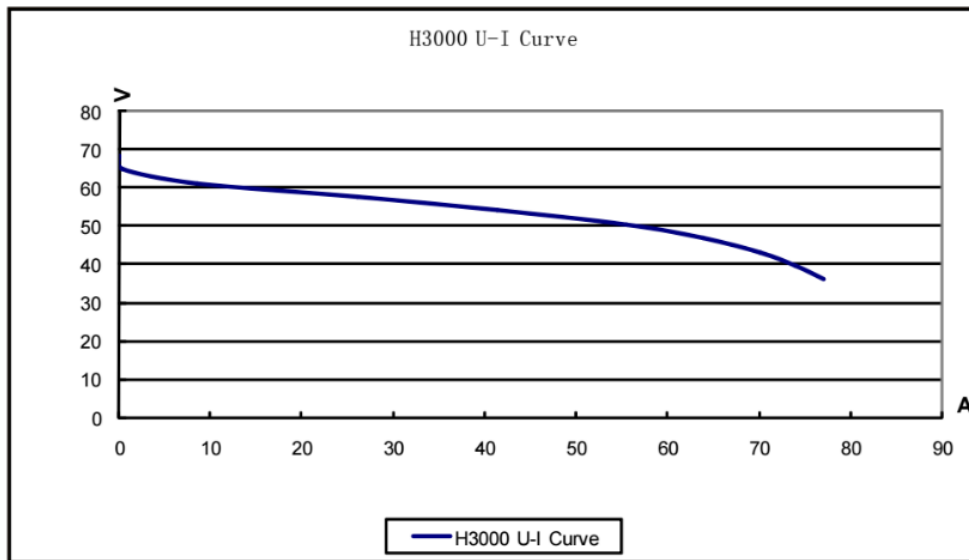
La pila está compuesta por placas bipolares de grafito mecanizadas con canales para permitir el flujo de aire e hidrógeno sobre la superficie de la membrana. El conjunto de placas bipolares se encuentra aislado eléctricamente de la carcasa protectora mediante unas placas de epoxy situadas en ambos extremos de la pila. A continuación de ellas, se sitúan dos placas gruesas de aluminio que actúan como placas terminales unidas por 12 varillas para mantener ensamblado el stack y ejercer la fuerza de compresión necesaria para evitar fugas de hidrógeno y asegurar un buen contacto eléctrico. El peso total de la pila es de 15 kg y su volumen es de 26 litros. Por lo tanto, tiene una potencia específica de 200 W/kg y una densidad de potencia de 115,38 W/l.

Esta pila de tipo PEM está compuesta por 72 celdas con sistemas membrana-electrodos (MEAs) de Nafion® con un área activa de unos 200 cm<sup>2</sup>, y en condiciones nominales genera 43,2 V y 70 A. Para el correcto funcionamiento de la pila la temperatura ambiente debe estar comprendida entre los 5 y los 40 °C, y la temperatura máxima que puede alcanzar el stack es de 65 °C. El hidrógeno que circula por el interior de la pila debe suministrarse con una presión manométrica entre 0,45 y 0,55 bar, y con una pureza superior al 99,995 %. Además debe de estar totalmente seco ya que la pila tiene un sistema de humidificación automático realizando un cortocircuito de 100 ms cada 10 segundos. El consumo de hidrógeno de la pila a máxima potencia es de 39 NI/min. El tiempo de arranque a temperatura ambiente está por debajo de los 30 segundos. La pila, incluyendo el sistema de control de potencia y el sistema de ventilación, tiene un rendimiento del 40 % en el punto de funcionamiento nominal. Para evitar daños en el stack, la pila no puede trabajar nunca por debajo de 36 V ni generar más de 90 A.

#### **4.2.1-Curvas de polarización**

Según el fabricante, la pila H-3000 tiene las siguientes curvas características de funcionamiento. Los datos han sido recopilados haciendo funcionar la pila en condiciones normales a nivel del mar y a temperatura ambiente dentro de un recinto cerrado.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante para alargar la vida útil del stack, el punto de operación será aquel donde se genere una densidad de corriente de 200 mA/cm<sup>2</sup>. En ese punto la pila ofrecerá 40 A a 54 V, lo que supondrá una potencia de 2160 W y un consumo de hidrógeno de 22,53 NI/min. También se ha establecido el punto de trabajo que no debe sobrepasarse para no comprometer la seguridad del dispositivo. Este es el que produce 65 A y 45,79 V, lo que supone una potencia de 2.976,35 W y un consumo de hidrógeno de 36,61 NI/min.

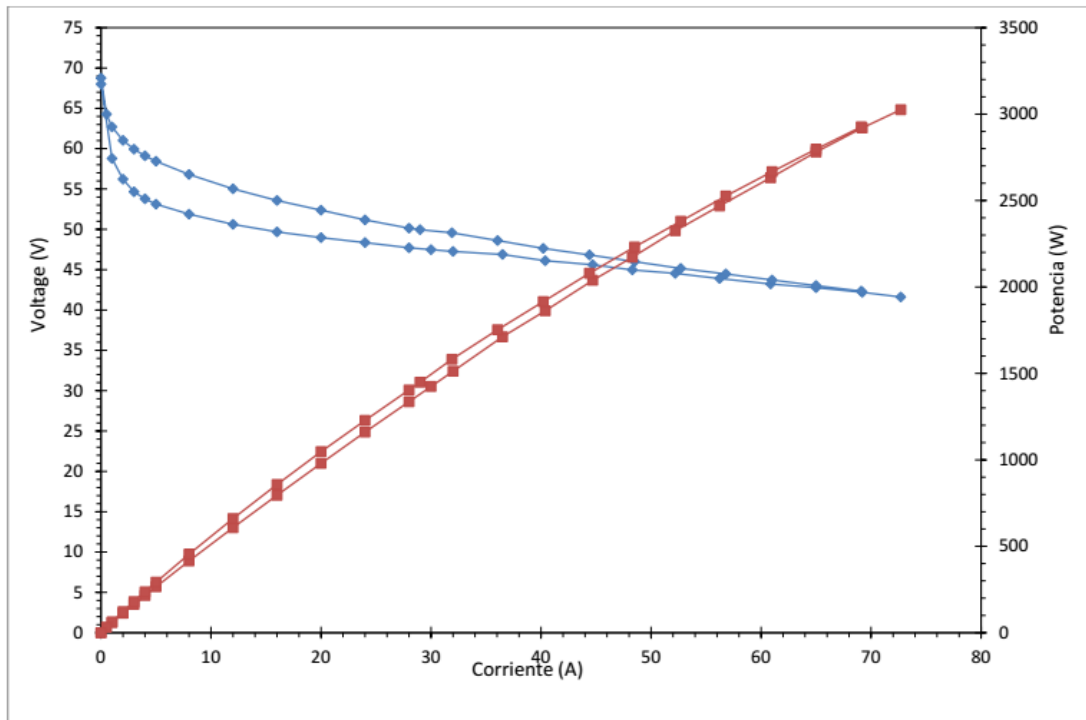


*Figura 4.3: Curva de voltaje-intensidad de la H-3000.*

#### **4.2.2-Ensayos experimentales de la pila**

Una vez que la pila H-3000 fue recibida en las instalaciones del LIFTEC, se llevó a cabo su acondicionamiento y caracterización experimental en el banco de ensayos de pilas de combustible existente en dichas instalaciones. Para poder realizar las pruebas necesarias se dispone de una carga electrónica dinámica que es capaz de fijar la corriente demandada a la pila.

Se han obtenido las curvas de polarización tanto de subida, desde el arranque hasta alcanzar la potencia máxima, como de bajada, reduciendo la potencia hasta la parada, para un valor fijo de presión de alimentación de 0,45 bar. Se puede observar que la pila ofrece más potencia cuando desciende la potencia. Esto puede deberse a que hasta que no se trabaja a altas densidades de corriente no se alcanza la temperatura necesaria para el funcionamiento óptimo. Además, es en estas densidades de corriente cuando se genera más agua por lo que las membranas de las MEAs estarán perfectamente humectadas. Por otra parte, el voltaje generado es algo menor de lo esperado debido a que la prueba se ha llevado a cabo sin realizarse el protocolo de cortocircuito por el cual la pila se humidifica automáticamente, además de la influencia de la presión de suministro de hidrógeno, que se ha fijado en su mínimo valor admisible para evitar problemas irreversibles causados por la sobrepresión sobre las membranas.



*Figura 4.4: Curva de polarización experimental de la H-3000.*

También se ha estudiado el funcionamiento del sistema de refrigeración de la pila para conocer mejor el control realizado sobre los ventiladores. Conforme aumenta la corriente generada por la pila, aumenta la temperatura de la misma. El voltaje suministrado a los ventiladores permanece constante a 4,66 V hasta que la pila llega a un valor cercano a los 50 °C, entonces aumenta hasta los 11,37 V para tratar de mantener la pila a 50 °C, logrando que siempre se mantenga por debajo de los 65 °C, la temperatura límite de operación.

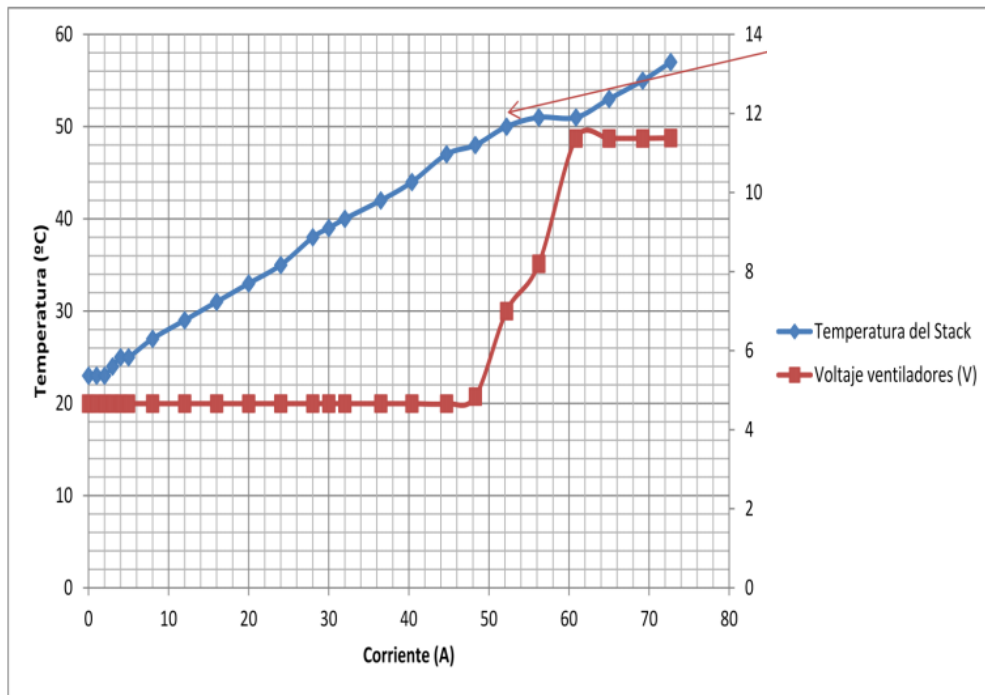


Figura 4.5: Temperatura del stack y consumo de los ventiladores en función de la corriente generada.

### 4.3-Implementación del sistema de pila de combustible en el vehículo

Para adaptar el sistema de suministro de energía original del vehículo eléctrico puro basado en baterías de plomo-gel al sistema híbrido con pila de combustible, ha sido necesario realizar tanto cambios estructurales como en la electrónica del vehículo, así como diseñar y fabricar los sistemas de recarga y suministro de hidrógeno.

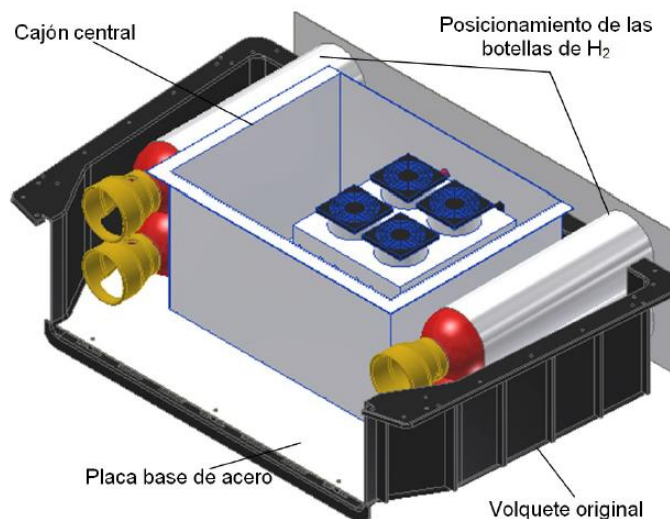
#### 4.3.1-Diseño del alojamiento para los diferentes sistemas

El conjunto de la pila de combustible, el sistema de almacenamiento y suministro de hidrógeno, así como la electrónica de control e hibridación se han instalado en el volquete situado en la parte trasera del vehículo.

Para ello, en primer lugar, se ha reforzado el bastidor original donde se apoya el volquete para que pueda soportar el sobrepeso causado por estos sistemas. A continuación, se ha diseñado una placa de acero inoxidable de 4 mm de espesor con la forma de la base del cajón del volquete, que sirve para sujetar y distribuir los distintos elementos y dispositivos. Esta placa va unida al chasis del vehículo mediante 12 silentblocks distribuidos por toda la superficie, los cuales permiten aislar la pila y sus dispositivos auxiliares de las vibraciones provocadas por la circulación del vehículo, especialmente si se desplaza por caminos no asfaltados.

En ambos laterales del cajón, se sitúan las 4 botellas de hidrógeno, apiladas 2 a 2, y fijadas a la placa de acero mediante un sistema de abrazaderas. Para emplazar las botellas de hidrógeno, ha sido necesario realizar cortes en la pared trasera del volquete, permitiendo que las mismas salgan de éste, ganando así algo de espacio interior.

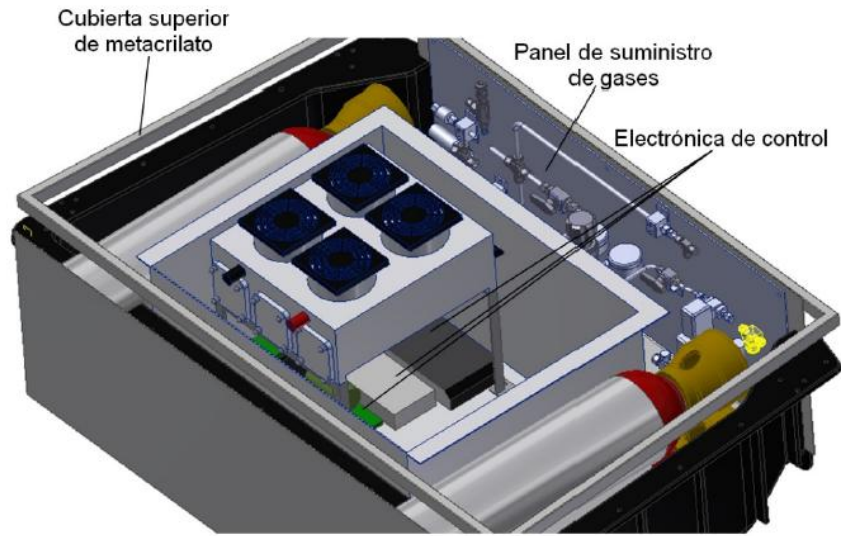
En la parte central, entre las botellas de hidrógeno, se sitúa un cajón de aluminio donde se colocan todos los sistemas electrónicos y la pila de combustible. De esta forma quedan aislados de la zona donde el hidrógeno está a alta presión. La parte superior del volquete se cubre con dos placas independientes de metacrilato de 5 mm de espesor para proteger los sistemas permitiendo, a su vez, su visibilidad. La placa situada sobre la parte de alta presión está unida al volquete mediante unos perfiles colocados en el perímetro exterior, que permiten disponer de un espacio para la ventilación de toda la zona, mientras que su parte interior y la placa de metacrilato que cubre el cajón de la electrónica se apoyan sobre el borde de este.



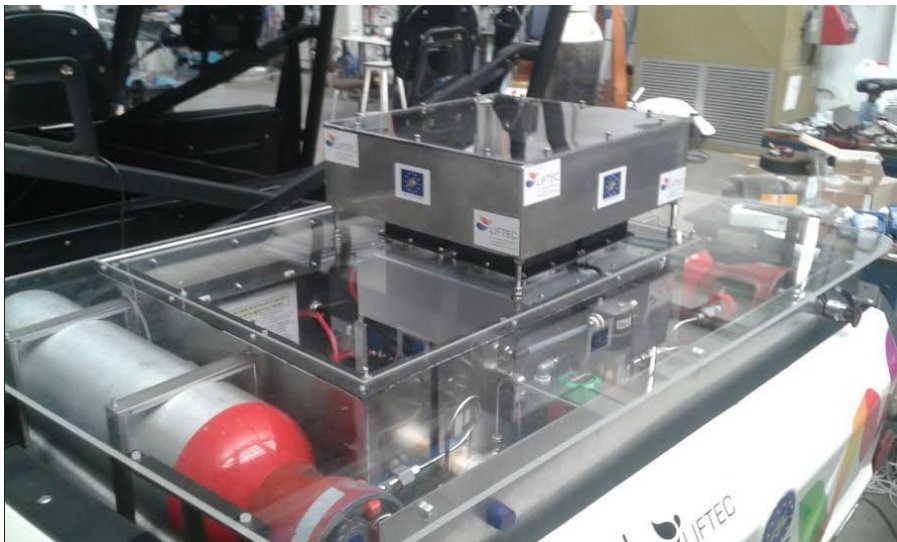
*Figura 4.6: Esquema de la distribución del espacio en el volquete (I).*

La pila, por su parte, se apoya sobre un soporte que la eleva una altura suficiente para que los ventiladores sobresalgan por encima de la placa de metacrilato a través de unos orificios abiertos. De esta forma el aire puede circular tanto a través de la pila como por las cajas donde se colocan los circuitos y tarjetas electrónicas para refrigerarlos. Sobre estas salidas se ha colocado una pequeña estructura para evitar la entrada de agua a los ventiladores. Para permitir la entrada de aire en el cajón de la electrónica se ha abierto una sección rectangular situada en el lateral del cajón que no está en contacto con la parte de alta presión, a la que se le ha instalado un filtro que evita la entrada de partículas.

Finalmente, todos los elementos necesarios para garantizar la recarga de gases a las botellas y el suministro de los mismos al stack se han posicionado en dos paneles enfrentados, uno situado en la pared trasera del volquete y otro sobre la pared del cajón de la electrónica. Para la correcta colocación del panel sobre el volquete se ha diseñado una placa de acero colocada sobre la puerta abatible del volquete, sujeta a los perfiles del chasis. Para posicionar la placa que sujeta el panel de suministro de hidrógeno ha sido también necesario recortar un tramo del borde del cajón.



*Figura 4.7: Esquema de la distribución del espacio en el volquete (II).*



*Figura 4.8: Foto del volquete trasero del vehículo cerrado, con todos los sistemas y dispositivos instalados.*



#### 4.3.2-Diseño del sistema de almacenamiento, recarga y alimentación

El hidrógeno que se emplea en la pila PEM del sistema híbrido se almacena en cuatro botellas de aluminio con un volumen de 10 litros y un peso de 12,75 kg cada una. Por lo tanto, el volumen de hidrógeno que se puede almacenar a una presión de 200 bar es de 7 Nm<sup>3</sup>, o lo que es lo mismo, 0,63 kg de hidrógeno, lo que en términos energéticos suponen 21,2 kWh. El sistema de almacenamiento del vehículo tiene una energía específica de 415,68 Wh/kg y una densidad energética de 530 Wh/l.

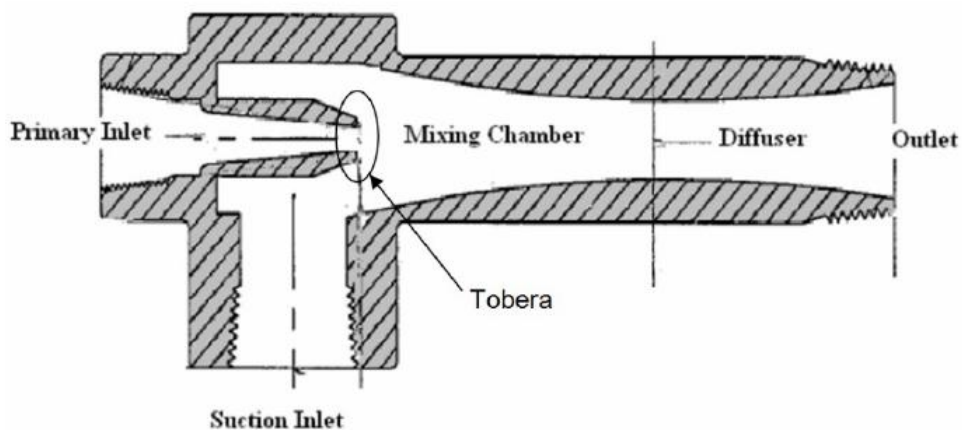
La boca de cada botella está protegida mediante una tulipa, que sirve como protección de la válvula manual en caso de accidente. Esta válvula se encontrará normalmente abierta y sólo se cerrará cuando sea necesario realizar trabajos de mantenimiento o reparación en el vehículo, ya que el control del llenado de las botellas y el suministro de hidrógeno a la pila se realizará mediante electroválvulas situadas en los paneles del sistema de distribución de gases. Para evitar problemas causados por las vibraciones y los golpes que pueda recibir el vehículo, las conexiones de las 4 cuatro botellas al sistema de distribución de gases se han realizado mediante tubos curvados en forma de tirabuzón para que absorban las posibles deformaciones.

El sistema de suministro se ha realizado, como se ha explicado en el apartado anterior, sobre dos paneles enfrentados, uno sobre la puerta trasera del volquete y otro sobre la pared del cajón de la electrónica. En dichos paneles se sitúan todos los componentes necesarios para la medición y el control del flujo de hidrógeno. A través de ellos se realiza tanto la recarga de las botellas cuando el vehículo está repostando en la hidrogenera como la descarga desde las botellas para alimentar la pila de combustible cuando el vehículo está operando.

En el repostaje, el hidrógeno entra por la boquilla de alimentación (*BoI*) de la etapa de alta presión y rellena las cuatro botellas (ver figura 4.17 de los anexos). La línea tiene una válvula antirretorno (*ArI*) que evita que el hidrógeno pueda circular hacia la boquilla de recarga. Aunque el compresor no puede suministrar gases a más de 200 bar, una válvula de sobrepresión (*VAI*) también protege la instalación en caso de que ocurra cualquier accidente. La descarga de las botellas se realiza por las mismas mangueras que la recarga. En este caso, el hidrógeno puede circular desde la etapa de alta presión hasta la de baja, donde el manorreductor (*VrI*) reduce la presión hasta 6,8 bar. A la salida del manorreductor se inicia la segunda etapa del suministro de hidrógeno que se realiza a baja presión. El flujo de hidrógeno que circula hacia la pila de combustible pasa por un filtro de partículas de 0,5 micras (*FI*) y llega a la electroválvula proporcional que controla el flujo de suministro. A continuación llega a un eyector de tipo Venturi que permite la recirculación de la parte del gas suministrado a la pila de combustible que no reacciona.

En una pila de combustible los caudales de gases son proporcionales a la corriente que se genera. En pilas de combustible que operan a presión ambiental no suele suministrarse la cantidad exacta para la reacción estequiométrica. En el caso del

hidrógeno se suele aportar entre un 5 y un 20 % más del gas necesario para asegurarse de que el mismo llega a todos los puntos de las capas catalíticas. Para evitar verter el exceso de gas que no reacciona al ambiente, el sistema de suministro de la pila incorpora, como novedad, un eyector tipo Venturi en la línea que permite recircular el hidrógeno no usado y volver a introducirlo en la pila. Para limpiar el gas recirculado se ha colocado un filtro que atrapa el agua y la elimina mediante purgas con una determinada frecuencia. Esta recirculación del gas es pasiva, por lo que no precisa de alimentación eléctrica.



*Figura 4.9: Geometría del Venturi.*

La velocidad del caudal principal de entrada se incrementa al pasar por la tobera mientras que su presión disminuye, lo que permite la succión del fluido secundario. Al consumirse el hidrógeno en la pila la presión de entrada tiende a bajar por debajo de 0,5 bar, por lo que el control de la válvula proporcional, a la cual llega la referencia de la presión medida a la salida del Venturi, provoca un aumento en la entrada del eyector. De esta forma el caudal suministrado al eyector se incrementará y la presión del gas a la entrada del stack se mantendrá constante en 0,5 bar. La electroválvula variará su presión manométrica entre 0 y 4,4 bar para conseguir el funcionamiento estable de la pila de combustible para todas las condiciones de trabajo.

Para el flujo de hidrógeno consumido por la pila de combustible, el cual puede llegar a ser superior a 50 NI/min debido a la relación estequiométrica, se ha seleccionado una tobera de 0,6 mm de diámetro. La regulación mediante la válvula proporcional de la presión en la entrada del Venturi permite controlar el caudal de hidrógeno que se suministra a la pila.

### 4.3.3-Sistema electrónico de acondicionamiento de potencia

El objetivo de la hibridación del vehículo es incorporar la energía eléctrica procedente de la pila de combustible al bus de potencia (*Busbar*) que conecta con los bornes del kit de baterías mediante un convertidor de potencia elevador no aislado (*CP1*). En el bus de potencia de las baterías se ha conectado también un convertidor aislado reductor de 12 V (*CP2*) que se encarga de alimentar a los sistemas auxiliares del sistema hidrógeno-pila de combustible. Además, el vehículo también extrae la potencia eléctrica para todos sus consumos desde el bus.

El sistema de control electrónico del vehículo se encarga de supervisar y controlar mediante diferentes sensores y actuadores, todos los sistemas que forman el nuevo sistema híbrido de suministro de energía, así como todas las variables relevantes que garantizan un funcionamiento satisfactorio y seguro del mismo.

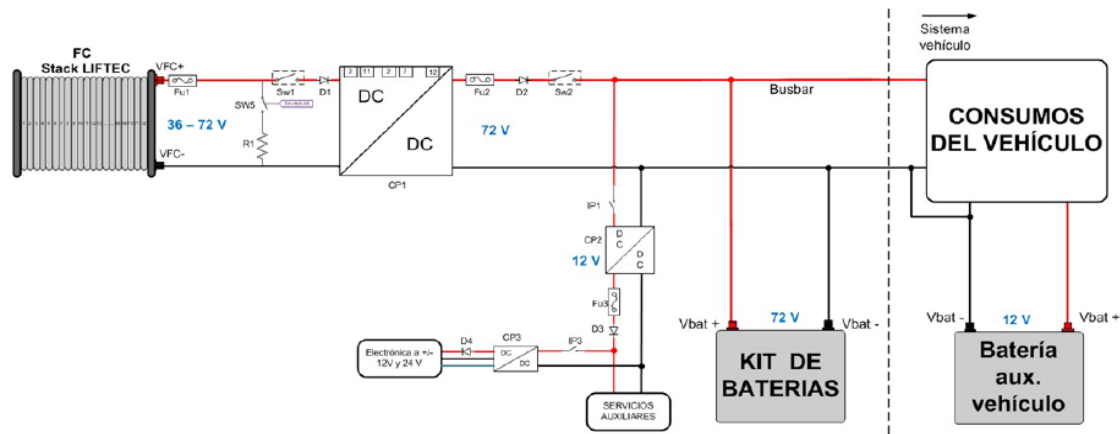


Figura 4.10: Esquema eléctrico del vehículo híbrido.

En el sistema diseñado la tensión del bus de potencia está fijada por las baterías, al igual que en su funcionamiento eléctrico convencional, con un voltaje máximo de recarga de 75,2 V, que corresponde a un 99,8 % del SOC, y un voltaje mínimo de 69 V que corresponde a un 30% del SOC aproximadamente. Por ello, el convertidor DC-DC (*CP1*) está controlado por corriente, y sólo podrá suministrar corriente al sistema cuando el SOC de las baterías esté por debajo del 95%, haciéndolo de manera proporcional a la potencia demandada por el vehículo. Se ha establecido que un 70% de la energía procederá de las baterías y un 30% de la pila de combustible. Cuando el vehículo consume poca energía, la energía excedente producida en la pila se dedica a recargar las baterías.

La electrónica de potencia que compone el sistema está formada por interruptores, fusibles y diodos de protección. Los interruptores de potencia permiten el paso de la corriente eléctrica generada por el stack y se desactivan cuando ocurre alguna anomalía o mal funcionamiento del sistema. Los fusibles protegen el sistema contra posibles

picos de corriente o cortocircuitos y los diodos permiten la circulación de la corriente en una única dirección. Cuando la pila de combustible está en funcionamiento y el interruptor de potencia (*Sw1*) se abre debido a un problema, se activa un relé (*Sw5*) que alimenta a una resistencia (*RI*), lo cual evita que la PEMFC opere en circuito abierto. Esta misma resistencia también se usa para consumir todo el hidrógeno que queda en la pila durante el protocolo de parada del stack.

#### 4.3.4-Máquina de estados de la pila y sistema de control

Para el control de la pila, se ha diseñado una máquina de estados, la cual ha sido programada en labVIEW y el código se ha embebido dentro de un microcontrolador con sistema operativo LINUX realtime en la plataforma RoboRIO.

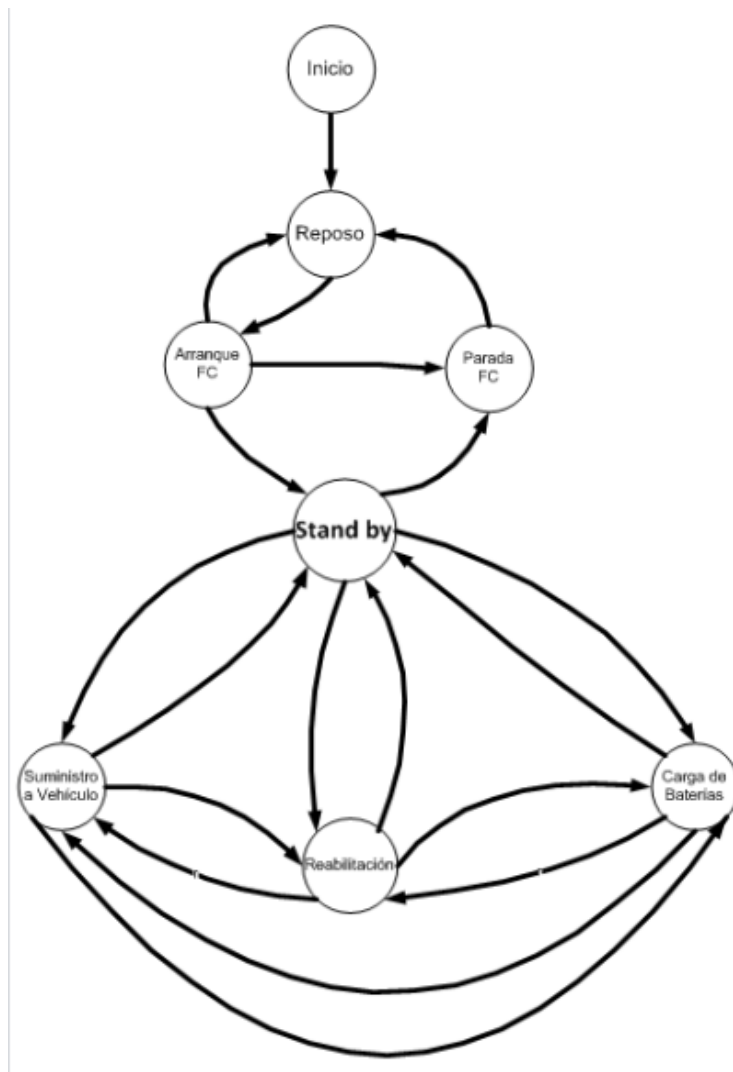


Figura 4.11: Esquema de la máquina de estados de la pila.

El primer estado de la máquina es el *inicio*, donde todos los actuadores son reseteados. Inmediatamente se pasa al estado de *reposo* donde espera hasta que el usuario presione el botón de encendido de la pila de combustible, situado en el salpicadero del vehículo. Si al presionar el botón todos los parámetros del sistema tienen unos valores adecuados, se pasa al *arranque* de la pila de combustible. Si debido a un problema, la pila no puede arrancar se volvería al estado de reposo. Si la pila arranca pero no trabaja adecuadamente, se pararía y se volvería al estado de reposo.

Si la pila de combustible ha arrancado correctamente y está operativa, se pasa al modo *stand-by*, donde la pila solo genera la energía que consumen los sistemas auxiliares. Si el sistema de control observa que las baterías están descargadas y el consumo del vehículo es bajo, se pasa al modo de *carga de baterías*. Si la demanda del vehículo aumenta, se pasa al modo de *suministro a vehículo*, donde la pila aporta el 30 % de la energía consumida por el motor. Si el sistema funciona correctamente, la máquina estará alternando entre estos dos estados, pero si en algún momento se observa que el voltaje que entrega la pila de combustible para una intensidad dada no se corresponde según la curva de polarización, se pasa al modo de *rehabilitación* de la pila. Estando en este estado, si después de cada purga el rendimiento aumenta en torno a un 10 %, significa que la pila se está encharcando por lo que hay que tratar de aumentar la presión del hidrógeno para expulsar al exterior el agua sobrante. Por el contrario, si no se lograra dicha recuperación, se realizaría una secuencia pasando por los modos *stand-by*, paro de la pila y finalmente se llegaría al reposo.

Si se agota el hidrógeno, se detecta una fuga, la temperatura supera los límites establecidos de funcionamiento, el voltaje del sistema es incorrecto o se presiona el botón de paro de la pila, se realizará la secuencia hasta llegar al estado de reposo. El sistema se mantendrá en ese estado hasta que se haya corregido la anomalía o se vuelva a pulsar el botón de arranque de la pila de combustible. La máquina de estado finalizará su funcionamiento cuando se desconecten las baterías, al quitar el contacto de la llave del vehículo.

La roboRIO posee internamente un acelerómetro de 3 ejes con una frecuencia de muestreo de 800 Hz. Este sensor se emplea para determinar la inclinación del vehículo, así como para saber si ha sufrido una aceleración o deceleración brusca que pueda interpretarse como un accidente del mismo. En ese caso, la señal generada se usa para cortar el suministro de hidrógeno y asegurar la protección de los usuarios. Además, se ha colocado una seta de emergencia (S3) en el salpicadero que, al ser pulsada, corta el suministro de energía al convertidor DC-DC, cerrando instantáneamente todas las electroválvulas de alta presión.



# 5-Cálculos y simulaciones

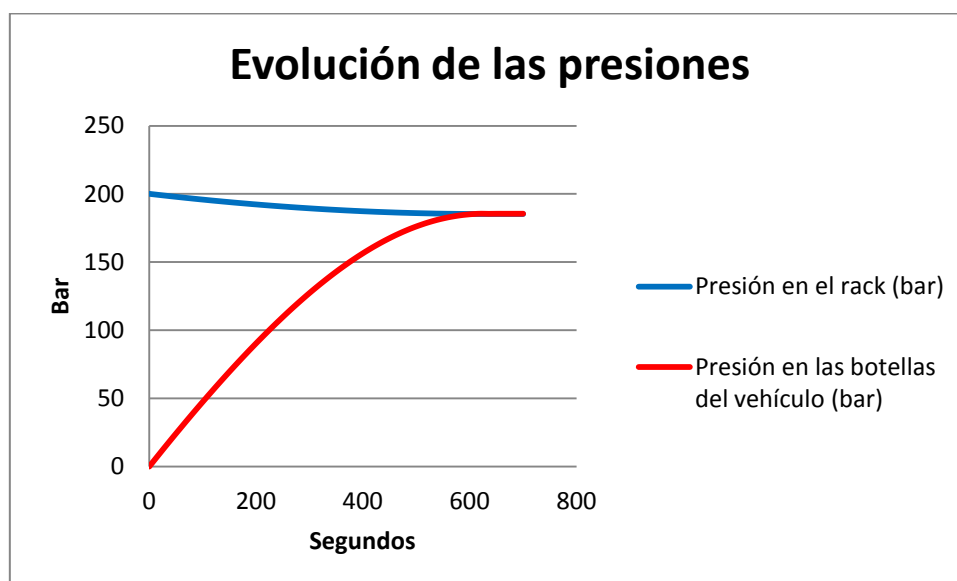
---

Con los datos mencionados en los capítulos anteriores, se han realizado los siguientes cálculos y simulaciones para poder conocer el funcionamiento de la hidrogenera y del vehículo. Todos los resultados deberán contrastarse con datos reales obtenidos durante la fase de pruebas de los prototipos, la cual está prevista que dé comienzo en el segundo semestre de 2016. Los cálculos se encuentran detallados en el anexo 5.

## 5.1-Vehículo

Los principales parámetros técnicos que se van a calcular para el vehículo son el tiempo de repostaje y su autonomía, analizando la cantidad de energía que aporta por una parte el sistema de baterías y por otro lado el sistema de pila de combustible.

### 5.1.1-Recarga del vehículo



*Figura 5.1: Evolución de las presiones.*

El tiempo estimado para el repostaje es de 11,66 minutos, aunque el 99 % de la recarga se realiza en 9,41 minutos. Una vez completado el repostaje se dispondrá de un volumen de hidrógeno almacenado a 185,5 bar de  $6,625 \text{ Nm}^3$ , teniendo en cuenta un factor de compresión de 1,12. En términos de masa se dispondrá de 0,595 kg de hidrógeno, que energéticamente suponen 19,85 kWh.

### 5.1.2-Consumo eléctrico del vehículo

El resultado final es un vehículo híbrido con 4,94 horas de autonomía de funcionamiento continuo. Por tanto, como el tiempo que está funcionando el coche para cada visita entre las dos bodegas es de 8 minutos (4 minutos por viaje), resulta que el coche podrá hacer más de 37 visitas al día. Esto supone un aumento del 83 % respecto al vehículo de baterías original. De la energía eléctrica suministrada al motor, un 45,4 % proviene de la generación mediante la pila de combustible y el 54,6 % restante de la energía acumulada en las baterías.

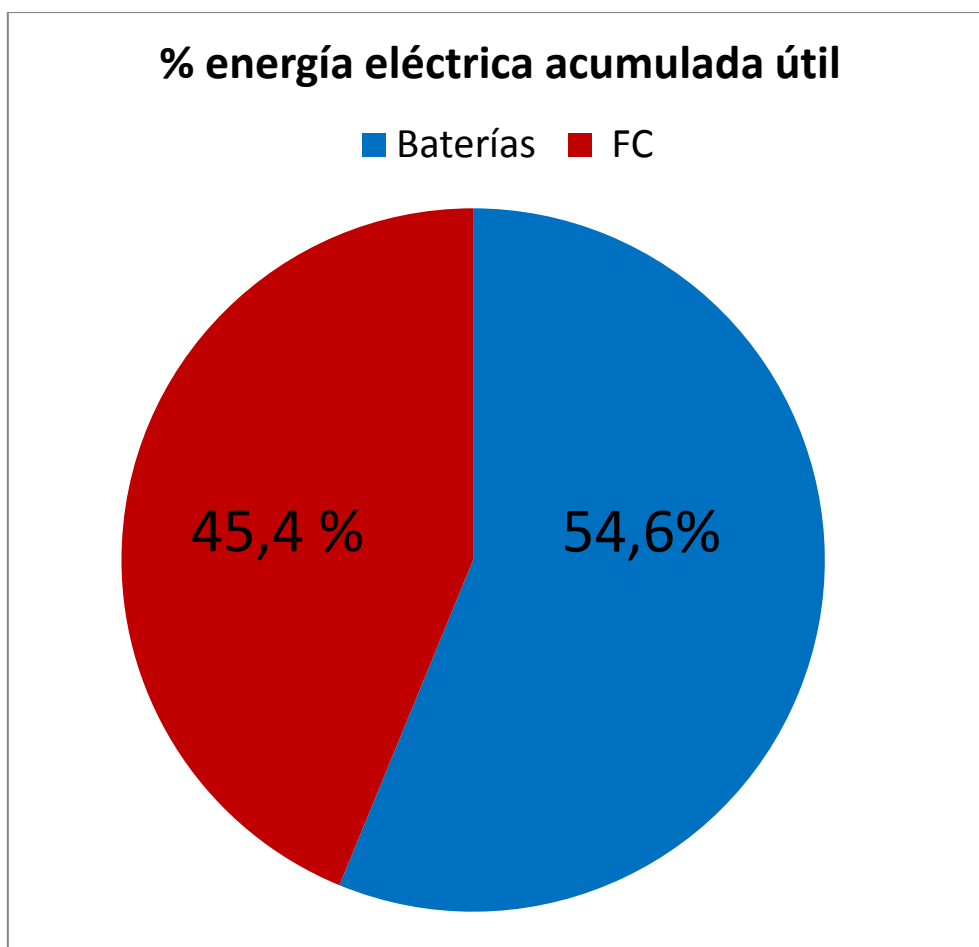


Figura 5.2: Porcentaje de energía eléctrica útil acumulada.



## **5.2-Hidrogenera**

Para el caso de la hidrogenera, formada por el electrolizador, el compresor, el rack de 12 botellas y el sistema de recarga de hidrógeno al vehículo, se ha estimado el rendimiento de la generación de hidrógeno y el tiempo que se tarda en generar la cantidad necesaria de este gas para alimentar al vehículo diariamente.

### **5.2.1-Generación de hidrógeno**

La producción de hidrógeno del electrolizador es de 500 NI/h, lo que en términos de potencia supone la generación de 1500 W, ya que cada metro cúbico de este gas tiene un contenido energético de 3 kWh.

El electrolizador tiene un consumo de 2390 W. Una vez generado, el gas debe ser comprimido hasta 200 bar con un compresor de membrana metálica que consume 750 W. Sumando ambas cifras, el consumo eléctrico total de la hidrogenera asciende a 3140 W. Por lo tanto, el rendimiento del sistema es de 47,77 %, mientras que el rendimiento del electrolizador es de 62,76 %, ambos referidos al PCI del hidrógeno.

### **5.2.2-Compresión**

Respecto a la etapa de compresión, si ésta se considera isoentrópica, es decir, adiabática y reversible se obtiene como resultado que para aumentar la presión de 30 a 200 bar se necesitan 6,48 MJ/kg, lo que supone un 6,5 % del PCI del hidrógeno comprimido.

### **5.2.3-Rack de bombonas**

El rack de bombonas recibe un caudal de 500 NI/h de hidrógeno comprimido a 200 bar procedente del compresor. El volumen total de hidrógeno que puede almacenar es de 106007 NI por lo que el tiempo estimado para rellenar todo el rack es de 8 días y 20 horas. Una vez realizado el repostaje del vehículo, se deben reponer 5854 NI de hidrógeno, lo que supone 11,7 horas, que se corresponden con el tiempo que debe trabajar el sistema de generación de hidrógeno diariamente para mantener al rack totalmente lleno a 200 bar.



# 6-Conclusiones y trabajo futuro

---

Durante la realización de este proyecto se ha diseñado, construido y puesto en marcha un sistema de generación de hidrógeno mediante electrólisis en una explotación agrícola aislada, a partir del excedente de una instalación fotovoltaica. El hidrógeno generado tiene como aplicación alimentar un vehículo eléctrico con baterías, el cual ha sido modificado para propulsarse híbridamente con una pila de combustible de tipo PEM. El trabajo realizado durante las fases de diseño, montaje y experimentación ha brindado la posibilidad de rediseñar algunos aspectos concretos en función de los resultados obtenidos.

Dada la envergadura del proyecto ha sido imposible realizar todas las tareas necesarias para la correcta caracterización de la instalación, además de retrasos ajenos al equipo del proyecto en el suministro de componentes esenciales de la planta. A pesar de los inconvenientes, se ha establecido el punto de partida para la optimización del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno, así como su uso en el vehículo eléctrico gracias a la experiencia adquirida durante la realización de esta laboriosa tarea.

A continuación se exponen las principales conclusiones derivadas de la realización de este proyecto, así como el trabajo futuro, tanto para realizar de forma inmediata como a más largo plazo.

## 6.1-Conclusiones

- Se ha realizado un estudio sobre el estado del arte de diversas tecnologías del hidrógeno, tales como la generación mediante electrólisis, almacenamiento y posterior transformación en electricidad mediante pilas de combustible, y su aplicación en la automoción. Esto ha permitido establecer un punto de partida para el propósito del proyecto.
- Se ha estudiado el recurso solar y la producción fotovoltaica instalada para abastecer las bombas de riego, lo que ha permitido conocer el excedente de energía para el correcto dimensionamiento de la hidrogenera.

- Se ha diseñado, construido y demostrado el funcionamiento de un sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno a pequeña escala en una explotación agrícola aislada a partir del excedente energético producido por la instalación fotovoltaica.
- Para dicha hidrogenera, se ha realizado la adecuada selección de equipos y se ha diseñado tanto el sistema de suministro de agua, el sistema de circulación de hidrógeno, los diferentes sistemas de venteo y desagüe, el sistema de repostaje del vehículo, y el sistema de control y seguridad de la instalación.
- Se han realizado diferentes pruebas de la pila comercial en el banco de ensayos para pilas de combustible del LIFTEC, lo que ha permitido conocer su comportamiento para diferentes condiciones de trabajo y establecer su punto óptimo de funcionamiento.
- Se ha realizado la modificación de un vehículo eléctrico de baterías para que pueda ser propulsado híbridamente mediante una pila PEM. Para ello, se ha diseñado y montado a bordo del vehículo un sistema de almacenamiento, recarga y alimentación de hidrógeno, así como un sistema electrónico de potencia y un sistema de control electrónico. Para alojar dichos sistemas, se han diseñado numerosos componentes que permiten el funcionamiento adecuado y seguro del sistema de hidrógeno.
- Se ha diseñado y verificado con éxito un novedoso sistema de recirculación de hidrógeno en el suministro a la pila mediante un Venturi y una válvula proporcional, lo que permite aprovechar al máximo la utilización del combustible.
- Se ha definido un sistema de control basado en una máquina de estados para la pila de hidrógeno, lo que facilita su integración en el sistema híbrido del vehículo y permite un control robusto de su funcionamiento.
- Se han realizado diversos cálculos, simulaciones y medidas experimentales que han permitido estimar importantes parámetros del funcionamiento del vehículo, como el tiempo de recarga y el consumo eléctrico. Así mismo, se ha estimado el rendimiento en la generación de hidrógeno o el tiempo de llenado del depósito estacionario de hidrógeno formado por 12 botellas de 50 l.

## **6.2-Trabajos a realizar en el futuro**

Hasta el momento, se ha realizado el diseño y construcción tanto de la instalación de generación y almacenamiento de hidrógeno como del vehículo, así como el análisis de su funcionamiento. Los siguientes pasos a llevar a cabo son:

- La operación en condiciones normales de funcionamiento de los diferentes sistemas durante un periodo de un año, recopilando tantos datos como sea posible sobre el funcionamiento de la instalación, así como la solución de problemas que puedan ir surgiendo debido a la operación de los distintos dispositivos.
- Una vez obtenidos los datos, se deberá proceder a la evaluación de los resultados, realizando diversos análisis que permitan profundizar en el conocimiento sobre este tipo de tecnologías.



# 7-Bibliografía

---

- [1] F. Bullón, El mundo ante el cenit del petróleo, Asociación para el estudio de los recursos energéticos (AEREN), 2006.
- [2] European comission, «Climate action,» 2016. [En línea]. Available: [http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050/index_en.htm). [Último acceso: Abril 2016].
- [3] European Union, «Roadmap 2050 practical guide to a prosperous, low-carbon Europe,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/>. [Último acceso: Octubre 2016].
- [4] White paper, «Roadmap to a Single Transport Area-Towards a competitive and resource efficient transport system,» 2011.
- [5] Ciemat, 2013. [En línea]. Available: <http://www.ciemat.es/suplementos/biocarburantes/>. [Último acceso: Octubre 2016].
- [6] C. e. al., «Life cycle assessment of various hydrogen production methods,» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 37, pp. 2071-2080, 2012.
- [7] B. M., «Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems,» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 33, pp. 4013-4029, 2008.
- [8] M. a. Veziroglu, «Green path from fossil-based to hydrogen economy,» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 33, pp. 6804-6839, 2008.
- [9] A. González García-Conde, «Asociación Española del Hidrógeno,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.udg.edu>.
- [10] Ramchandra B., «Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis,» *Journal of cleaner production*, nº 85, pp. 151-163, 2014.
- [11] H. T. Wasserstoff, «Technologien und Marktperspektiven,» 2014. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org>.
- [12] U. D. o. energy, «Report of the hydrogen production expert panel,» 2013. [En línea]. Available: <http://hydrogen.energy.gov>.

- [13] T. H. Markus Felgenhauer, «State-of-the-art of comercial electrolyzers and on-site hydrogen generation for logistic vehicles in South Carolina,» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 40, pp. 2084-2090, 2015.
- [14] DOE, «Energy requirements for hydrogen gas compresion and liquefaction as related to vehicle storage needs,» Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2010.
- [15] B. A. Zhao Hengbing, «Fuel Cell Powered Vehicles Using Supercapacitors: Device Characteristics Cpnrol Strategies and simulation Results,» Institute of transportation studies, University of California, 2010.
- [16] V. M. M. Pociello, «Diseño, montaje y puesta en marcha de un sistema de baterías con BMS para vehículo eléctrico,» EINA, Universidad de Zaragoza, 2015.
- [17] F. Barbir, «PEM Fuel Cells,» Elseiver academic press, 2005.
- [18] I. S. J. L. S. Bruno G. Pollet, «Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: from electrochemistry to market prospects.,» *Electrochimica Acta*, nº 84, pp. 235-249, 2012.
- [19] J. G. B. Scrosati, *Journal of Power Sources*, nº 195, p. 2419, 2010.
- [20] ARPA-E, «Electrical Energy Storage for Vehicles: Post Workshop Summary,» Washington DC, 2009.
- [21] D. o. Energy, «DOE USA,» 2012. [En línea]. Available: [http://www.autonomie.net/publications/fuel\\_economy\\_report.html](http://www.autonomie.net/publications/fuel_economy_report.html).
- [22] PVGIS. [En línea]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>.
- [23] «Fuel Cell Technologies Program,» U.S. Department of energy, 2010.
- [24] J. Z. e. al, «High Temperature PEM fuel cells,» *Journal of Power sources*, nº 160, pp. 872-891, 2006.
- [25] k. Elif., «Recent advances in production of hydrogen from biomass,» *Energy Conversion and Management*, nº 52, pp. 1778-1789, 2011.
- [26] L. J. M. J. a. M. N. M. Blomen, «Fuel Cell Systems,» New York, Plenum Press, 1993.
- [27] U. D. o. Energy, «Fuel Cell Handbook,» 2004.



- [28] CSIC-UIMP, «Máster en energías renovables,» de *Pilas de combustible e hidrógeno*, 2010.
- [29] C. E., «Thermodynamics and Electrochemical Kinetics,» de *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press, 2003.
- [30] D. K. Watkins DS.US Patente 5.108.849, 1992.
- [31] I. S. Xianguo Li, *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 30, pp. 359-371, 2005.
- [32] H. L. Lin Wang, «Performance studies of PEM fuel cells with interdigitated flow fields,» *Journal of Power Sources*, nº 134, pp. 185-196, 2004.
- [33] Shou-Shing Hsieh, «Study of operational parameters on the performance of micro PEMFCs with different flow fields,» *Energy Conversion and Management*, nº 47, pp. 1868-1878, 2006.
- [34] R. G. R. Atul Kumar, «Effect of gas flow-field design in the bipolar/end plates on the steady and transient state performance of polymer electrolyte membrane fuel cells,» *Journal of Power Sources*, nº 155, pp. 264-271, 2006.
- [35] I. S. J. P. Xianguo Li, «A flow channel design procedure for PEM fuel cells with effective water removal,» *Journal of Power Sources*, nº 163, pp. 933-942, 2007.
- [36] B.-L. Y. Shan-Hai Ge, «A mathematical model for PEMFC in different flow modes,» *Journal of Power Sources*, nº 163, pp. 933-942, 2003.
- [37] F. X. G. G. O. D. Arnaud Morin, «Influence of PEMFC gas flow configuration on performance and water distribution studied by SANS: evidence of the effect of gravity,» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 36, pp. 3096-3109, 2011.
- [38] Inmaculada Arauzo, Hidrógeno y pilas de combustible, Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética, 2015.
- [39] S. G., «Wind-to-hydrogen project: electrolyzer capital cost study,» US National renewable energy laboratory, Golden, USA, 2008.
- [40] S. a. Mann, «Life cycle assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming,» US National renewable energy laboratory, Golden, USA, 2001.

- [41] K. e. al., «Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes,» *International journal of Hydrogen Energy*, n° 29, pp. 1443-1450, 2004.
- [42] «Preciogas,» 2016. [En línea]. Available: <http://preciogas.com/conceptos/precio-kwh#precio-kwh-segun-energia>.
- [43] N. A. K. Thomas L. Gibson, «Predicting efficiency of solar powered hydrogen generation using photovoltaic-electrolysis devices,» *International Journal of Hydrogen Energy*, n° 35, pp. 900-911, 2010.
- [44] C. A. Ibrahim Dincer, «Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability,» *International Journal of Hydrogen Energy*, n° 30, pp. 1-18, 2014.
- [45] M. R. e. al., «Hollow Glass Microspheres as Micro Media for Complex Metal Hydrides,» 2011.
- [46] B. e. al., «Hydrogen high pressure tanks storages: overview and new trends due to H<sub>2</sub> energy specifications and constrains,» de *WHEC* , Lyon, France, 2006.
- [47] DOE, «Hydrogen Storage,» 2013. [En línea]. Available: [https://www1.eere.energy.gov/hydrogenfuelcells/storage/hydrogen\\_storage.html](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenfuelcells/storage/hydrogen_storage.html).
- [48] A. N. Laboratory, «Technical Assessment of Cryo-Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for automotive applications,» 2009. [En línea]. Available: [https://www1.eere.energy.gov/hydrogenfuelcells/pdfs/cryo\\_compressed\\_auto.pdf](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenfuelcells/pdfs/cryo_compressed_auto.pdf).
- [49] [En línea]. Available: <http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/research/T531%20Feasibility%20study%20in%20to%20the%20use%20of%20hydrogen%20fuel%20Final%20Report.pdf>.
- [50] D. o. Energy, «Fuel Cel Technologies Market Report,» USA, 2012.
- [51] Tesla. [En línea]. Available: <https://www.teslamotors.com/>.
- [52] IDAE, «Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión,» 2008.
- [53] C. S. Thomas, «How green are electric vehicles?,» *International Journal Of Hydrogen Energy*, n° 37, pp. 6053-6062, 2012.

- [54] R. K. Malen DE, «Preliminary vehicle mass estimation using empirical subsystem influence coefficients,» University of Michigan, 2007. [En línea]. Available: <http://www.a-sp.org/database/custom/Mass&20Compounding%20-%20Final%20Report.pdf>.
- [55] M. M. Boettner DD, «Proton exchange membrane (PEM) fuel cell-powered vehicles performance using direct-hydrogen fueling and on-board methanol reforming,» *Energy*, pp. 2317-30, 2004.
- [56] T. CE., «Fuel cell and battery electric vehicles compared,» *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 6005-6020, 2009.
- [57] R. M. Ayfer Veziroglu, «Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns,» *International Journal of Hydrogen Energy*, n° 36, pp. 25-43, 2011.
- [58] IDAE. [En línea]. Available: <http://atlaseolico.idae.es/meteosim/>.