

Trabajo Fin de Grado

Diseño y cálculo para integración de un electrolizador alcalino en un sistema de aplicación de H₂ para bancos de ensayo, pilas de combustible e hidrogenera en Fundación Hidrógeno Aragón (FHa): Memoria

Design and calculation for integration of an alkaline electrolyzer in an H₂ application system for test benches, fuel cells and hydrogen plants at Fundación Hidrógeno Aragón (FHa): Memory

Autor

Francisco Oliva Serrano

Director

Miguel Ángel Torres Portero

Codirector

Pedro Casero Cabezón

Grado en Ingeniería Mecánica

2024



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Diseño y cálculo para integración de un electrolizador alcalino en un sistema de aplicación de H₂ para bancos de ensayo, pilas de combustible e hidrogenera en Fundación Hidrógeno Aragón (FHa): Memoria

RESUMEN

La presente documentación tiene por finalidad la viabilidad de la instalación del electrolizador alcalino McPhy en sustitución del electrolizador Enapter, así como, la descripción del diseño y justificación de las instalaciones para su funcionamiento y para la producción de hidrógeno mediante energías renovables, su posterior almacenamiento y su utilización preferentemente para el repostaje de vehículos a través de una hidrogenera y, además, tanto para bancos de ensayo como para pilas de combustible.

La presente documentación se redacta por encargo de:

**FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS
DEL HIDRÓGENO EN ARAGÓN**

C.I.F. nº G-22280010

Domicilio Social: Parcela 24 del Parque Tecnológico WALQA - Cuarte (Huesca)

PALABRAS CLAVE

Hidrógeno, Electrolizador, Depósito, Compresor.

Design and calculation for integration of an alkaline electrolyzer in an H₂ application system for test benches, fuel cells and hydrogen plants at Fundación Hidrógeno Aragón (FHa): Memory

ABSTRACT

The purpose of this documentation is the feasibility of installing the McPhy alkaline electrolyzer to replace the Enapter electrolyzer, as well as the description of the design and justification of the facilities for its operation and for the production of hydrogen using renewable energies, its subsequent storage and its use is preferably for refueling vehicles through a hydrogen generator and, furthermore, for both test benches and fuel cells.

This documentation is written on behalf of:

**FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS
DEL HIDRÓGENO EN ARAGÓN**

V.A.T. nº G-22280010

Registered Office: Parcela 24 del Parque Tecnológico WALQA - Cuarte (Huesca)

KEY WORDS

Hydrogen, Electrolyzer, Tank, Compressor.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas las personas que contribuyeron a mi éxito y a mi crecimiento personal, gracias a todas las personas que me apoyaron en los fracasos, pero sobre todo gracias a las personas que me criaron y guiaron a ser como soy, estén todavía o no entre nosotros.

Soy el resultado de la confianza, la fuerza y las experiencias que viví con cada uno de ustedes.

Índice

Índice	5
Índice de figuras y tablas	6
Introducción.....	8
Fundación Hidrógeno Aragón (FHa).....	12
El proyecto “Corredor de Hidrógeno para la Región Pirenaica” (H2PiyR)	14
Proyecto LA6.A3 Reacondicionamiento de la HRS de WALQA a 700 bar	17
Descripción general de la instalación existente en FHa	19
Objetivo	27
Instalación de redes necesarias para el funcionamiento	31
Redes de Hidrógeno.....	31
Red de Oxígeno	32
Red de Potasa.....	32
Red de Nitrógeno	32
Red de Aire comprimido.....	33
Red de tuberías de venteo	33
Materiales.....	33
Normativa y legislación aplicable	34
Normativa Europea	34
Normativa Nacional.....	34
Normas Técnicas y Guías, disposiciones no obligatorias.....	36
Metodología.....	37
Electrolizador Enapter	38
Primer método: Producción contra depósito pulmón.....	38
Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”	38
Electrolizador McPhy	39
Primer método: Producción contra depósito pulmón.....	39
Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor ...	39
Tercer método: Compresión contra depósito”prepulmón”	40
Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito”prepulmón”.....	40
Conclusión y recomendaciones	41
Referencias	45

Índice de figuras y tablas

Figura 1: Pacto Verde Europeo [1].....	9
Figura 2: Logotipo Alianza Europea para el hidrógeno limpio [2]	9
Figura 3: Logotipo de Fundación Hidrógeno Aragón [3]	12
Figura 4: Empresas que componen el patronato de FHa (2021) [4].....	13
Figura 5: Mapa objetivo de red de hidrogeneras [5]	15
Figura 6: Logotipo del proyecto H2PiyR [5]	15
Figura 7: Hyundai Nexo propiedad de FHa junto a la hidrogenera de 350 bar [5]	16
Figura 8: Módulo electrolizador de la marca Enapter, modelo EL2.1 versión 2 en instalaciones de FHa.....	22
Figura 9: Depósito pulmón, buffer, en instalaciones de FHa	22
Figura 10: A la izquierda, dispensador antiguo de 350 bar. A la derecha, nuevo modelo de dispensador de 700 bar. Ambos en instalaciones de FHa.....	23
Figura 11: Compresor Hoffer modelo MKZ 120-15/100-40 en instalaciones de FHa ..	23
Figura 12: Bloque de botellas para almacenamiento de hidrógeno a 350 bar en instalaciones de FHa.....	24
Figura 13: Compresor PDC modelo PDC-3-6000/15000(100) en instalaciones de FHa	24
Figura 14: Bloque de botellas para almacenamiento de hidrógeno a 900 bar en instalaciones de FHa.....	25
Figura 15: Bloque de botellas para almacenamiento de hidrógeno a 500 bar en instalaciones de FHa.....	25
Figura 16: Enfriadora de Intarcom, modelo ECO ₂ CUBE, en instalaciones de FHa	26
Figura 17: Modelo simplificado del proceso de producción del electrolizador Enapter para la hidrogenera con dispensación a 350 bar.....	27
Figura 18: Modelo simplificado del proceso de producción del electrolizador Enapter para la hidrogenera con dispensación a 700 bar.....	27
Figura 19: Módulo electrolizador McPhy, modelo Piel by McPhy, Rev: 1.03 en instalaciones de FHa.....	28
Figura 20: Modelo simplificado del proceso de producción del electrolizador McPhy para la hidrogenera con dispensación a 350 bar.....	29

Figura 21: Modelo simplificado del proceso de producción del electrolizador McPhy para la hidrogenera con dispensación a 700 bar.....	30
Figura 22: Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito pulmón del electrolizador Enapter.....	38
Figura 23: Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito “prepulmón” del electrolizador Enapter.....	38
Figura 24: Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito pulmón del electrolizador McPhy.....	39
Figura 25: : Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito acumulador previo al compresor del electrolizador McPhy.....	39
Ilustración 26: : Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito “prepulmón” del electrolizador McPhy.....	40
Figura 27: Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón” del electrolizador McPhy	40
Tabla 1. Colores del hidrógeno [8].....	19
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los diseños de compresión [9]	20
Tabla 3: Resumen validez de los métodos propuestos para cada electrolizador	41
Tabla 4: Comparación de los resultados obtenidos para ambos electrolizadores	42
Tabla 5: Comparación de cantidad de hidrógeno producida para el mismo tiempo entre los dos electrolizadores.....	42
Tabla 6: Comparación de costes energéticos para ambos electrolizadores	43

Introducción

La transición energética para alcanzar sociedades climáticamente neutras no es una idea de futuro, sino que es una realidad en la que ya estamos plenamente involucrados. Conscientes de que el cambio climático y la degradación medioambiental es una de las principales amenazas a las que se enfrenta Europa y el resto del mundo, se están desarrollando legislación, normativa y planificación al respecto, incluyendo al hidrógeno como uno de los elementos claves de esta descarbonización.

La Unión Europea, en el nuevo mandato 2019 - 2024, ha propuesto una agenda política con una serie de prioridades que abordarán en este periodo los principales retos a los que se enfrentan los miembros de la UE tanto a nivel político como social. Estas prioridades de la Comisión Europea son:

- Un pacto verde europeo.
- Una Europa adaptada a la era digital.
- Una economía al servicio de las personas.
- Una Europa más fuerte en el mundo.
- La promoción de nuestro modo de vida europeo, y
- Un nuevo impulso a la democracia europea.

La inversión de la Unión Europea se puede decir que pivota en torno a tres pilares: El Pacto Verde, la Transición Digital y la Reindustrialización denominados “vectores de transformación”.

De todos ellos, destaca el Pacto Verde Europeo (Green Deal), presentado en diciembre de 2019, que fue de las primeras acciones señaladas en la agenda para transformar la UE en una economía moderna, eficiente en el uso de recursos y competitiva, basada en la reducción de emisiones y la creación de empleo y con un objetivo general de alcanzar una Europa climáticamente neutra en 2050.

El Pacto Verde Europeo incluye al hidrógeno como uno de los elementos clave para alcanzar dicha neutralidad en 2050. La descarbonización de la energía se conseguirá reemplazando el uso de combustibles fósiles por las energías renovables (EERR). Dada

la intermitencia de las EERR, el almacenamiento resulta esencial para esa transición y es aquí donde el hidrógeno se ha reconocido como la opción más prometedora. [1]

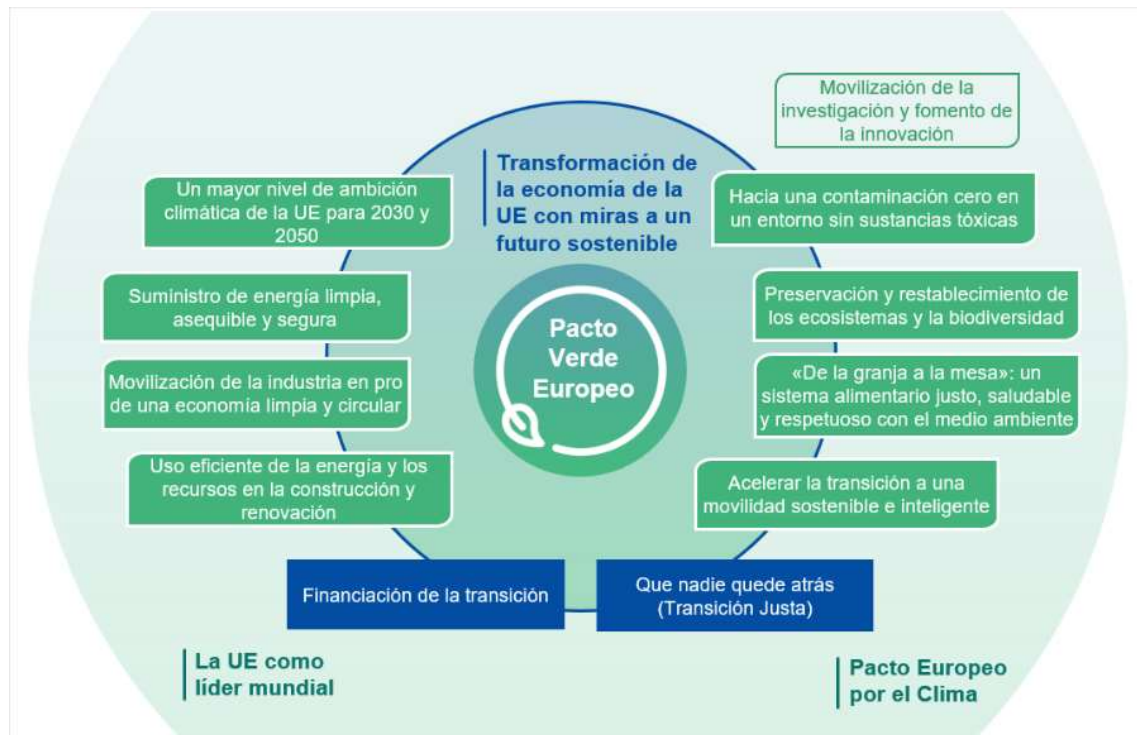


Figura 1: Pacto Verde Europeo [1]

Para alcanzar el cumplimiento del Pacto Verde Europeo nace la Alianza Europea para el hidrógeno limpio (European Clean Hydrogen Alliance ECH2A), que fue constituida oficialmente en la reunión de lanzamiento el 8 de julio de 2020.



Figura 2: Logotipo Alianza Europea para el hidrógeno limpio [2]

La Alianza reúne a la industria, las autoridades nacionales y locales, la sociedad civil y otros interesados. En 2020 la Alianza reunió a unos 500 agentes, en 2021 prácticamente consiguió duplicar esta cifra superando sus previsiones y continúa abierta a una mayor participación.

El objetivo de la Alianza es apoyar toda la cadena de valor del hidrógeno, abarcando el hidrógeno renovable y de bajo contenido de carbono desde la producción, pasando por la transmisión y distribución, hasta las aplicaciones de movilidad, industria, energía y aplicaciones residenciales.

La Alianza, a su vez, dictamina la estrategia Europea del Hidrógeno (EUROPEAN HYDROGEN STRATEGY), aprobada por resolución del Parlamento Europeo el 19 mayo de 2021, que constituye una herramienta clave para alcanzar los objetivos del Pacto Verde y la neutralidad climática en 2050, apoyando el liderazgo de la industria de la UE en su transición hacia la neutralidad climática al tiempo que se crean nuevos mercados.

La estrategia incide en la inclusión del hidrógeno en varios usos: descarbonización de la electricidad, uso amplio en transporte (incluyendo transporte pesado, marítimo y aviación), uso industrial y uso doméstico.

La prioridad es desarrollar un hidrógeno renovable, utilizado principalmente para su producción energía eólica y solar, que permita alcanzar la neutralidad climática. De cara a 2050 el hidrógeno renovable se debe desplegar progresivamente a gran escala, con una tecnología madura y una disminución de costes. No obstante, no se debe olvidar que los mercados se rigen por la competitividad y por tanto para alcanzar estos objetivos es posible que se necesiten otras formas de producir hidrógeno con bajas emisiones de carbono, para apoyar el uso paralelo y futuro del hidrógeno renovable. De esta forma, el desarrollo del hidrógeno se presenta de una forma gradual con tres hitos principales 2024, 2030 y 2050.

De acuerdo con la estrategia, en la *primera fase*, de 2020 hasta 2024, el objetivo estratégico es instalar al menos 6 GW de electrolizadores de hidrógeno renovable en la UE y la producción de hasta un millón de toneladas de hidrógeno renovable. Para ello se debe aumentar la fabricación de electrolizadores, incluidos los del gran tamaño (100 MW). Se contempla en esta fase fomentar el consumo industrial de las refinerías de mayor tamaño, las acerías y los complejos químicos. En movilidad se apuesta por la utilización de autobuses con pila de combustible de hidrógeno y, en una fase posterior, transporte pesado y el despliegue de las estaciones de repostaje de hidrógeno, así como una infraestructura de transporte de hidrógeno. De este modo, aunque al inicio se satisfará con la producción cercana o in-situ, deberá iniciarse una planificación de infraestructura de medio y largo alcance.

En una *segunda fase*, desde 2025 a 2030, el hidrógeno debe convertirse en una parte intrínseca de un sistema energético integrado con el objetivo estratégico de instalar al menos 40 GW de electrolizadores de hidrógeno renovable a más tardar en 2030 y la producción de hasta diez millones de toneladas de hidrógeno renovable en la UE29.

En una *tercera fase*, desde 2030 en adelante y hacia 2050, las tecnologías de hidrógeno renovable deben alcanzar su madurez y desplegarse a gran escala para llegar a todos los sectores de difícil descarbonización, donde otras alternativas podrían no ser viables o tener costes más elevados.

Las inversiones acumuladas estimadas en la Estrategia Europea del Hidrógeno en Europa podrían alcanzar entre 180 y 470 mil millones de euros desde ahora hasta el 2050. [2]

La Fundación Hidrógeno Aragón, se adhiere a la Alianza Europea para el hidrógeno limpio en septiembre del año 2020, ya que sus intereses y objetivos particulares se alinean con los de la Alianza.

Fundación Hidrógeno Aragón (FHa)

La Fundación Hidrógeno Aragón, también conocida por su nombre completo Fundación para el desarrollo de las nuevas tecnologías del Hidrógeno en Aragón o por sus siglas FHa, fue impulsada por el Gobierno de Aragón con el apoyo de la industria aragonesa y entidades de diferentes sectores de actividad que consideraron el hidrógeno como un nuevo camino de desarrollo tecnológico e industrial, que conllevaría a la creación de conocimiento y de empleo de calidad en la región.



Figura 3: Logotipo de Fundación Hidrógeno Aragón [3]

Veintiocho entidades, centros de investigación y empresas respaldaron esta iniciativa en 2003 y, a ellos se van sumando año tras año nuevos apoyos, que se traducen en un patronato formado por 93 miembros, en su mayor parte empresas privadas, de los que salen una parte de las inversiones para llevar a cabo los diferentes estudios y proyectos tanto teóricos como técnicos.

Diseño y cálculo para integración de un electrolizador alcalino en un sistema de aplicación de H₂ para bancos de ensayo, pilas de combustible e hidrogenera en Fundación Hidrógeno Aragón (FHa)



Figura 4: Empresas que componen el patronato de FHa (2021) [4]

El objetivo de FHa es producir, almacenar, transportar, distribuir y generar aplicaciones para el hidrógeno con el fin de poder utilizarlo en pilas de combustible, aplicaciones de transporte o generación distribuida de energía. Y de este modo propiciar

la investigación, el desarrollo tecnológico y la adaptación industrial de la comunidad de Aragón y de España. [3]

Englobado en el marco de sus objetivos y con ayuda de fondos provenientes de la Unión Europea, FHa se propuso impulsar la movilidad sostenible y unir a España con el resto de miembros de la Unión Europea a través de lo que se denominó el proyecto “Corredor de Hidrógeno para la Región Pirenaica” o por sus siglas H2PiyR.

El proyecto “Corredor de Hidrógeno para la Región Pirenaica” (H2PiyR)

El proyecto “Corredor de Hidrógeno para la Región Pirenaica” (H2PiyR) desarrolló un banco de pruebas a escala real de un corredor transfronterizo de estaciones de repostaje para vehículos de hidrógeno que conecta las regiones pirenaicas de España y Francia con el centro y norte de Europa, donde el despliegue de infraestructuras asociado a este tipo de movilidad sostenible sin emisiones está más avanzado.

Este proyecto se alinea con las distintas iniciativas impulsadas por la Unión Europea para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promocionar el uso de las energías renovables. También guarda relación con los planes de los principales países con estrategias de movilidad sostenible, con la voluntad de los territorios de promover el aprovechamiento local de sus recursos energéticos, con circuitos locales de producción-distribución, con proyectos similares ya desarrollados y en curso en el ámbito de la Unión Europea y con la experiencia que en este campo tienen los distintos socios participantes.

El objetivo principal de H2PiyR es la utilización de dos estaciones de suministro de hidrógeno situadas en España (Huesca) y Francia (Pamiers). A esta red de estaciones se unirán las ya operativas en Francia (Rodez y Albi).

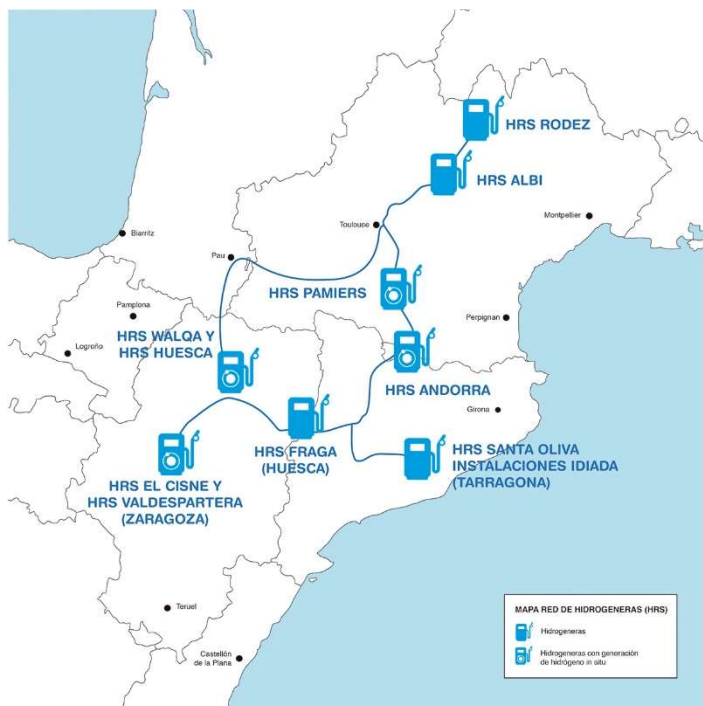


Figura 5: Mapa objetivo de red de hidrogeneras [5]

El despliegue del hidrógeno puede jugar un papel crítico para un transporte sostenible y libre de contaminantes en la UE, lo cual lo convierte en un elemento clave para cumplir políticas como la Directiva 2014/94/EU, que insta a los estados miembros a lanzar una infraestructura de recarga de vehículos propulsados con combustibles limpios entre los que se encuentra el hidrógeno, u otras que establecen objetivos de calidad de aire, emisiones contaminantes y similares.

El presupuesto total del proyecto H2PiyR ascendió a 1,6 millones de euros, de los que el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) aportó el 65% (963 mil euros) a través del Programa POCTEFA. El proyecto se desarrolló del 1 de julio de 2016 al 30 de junio de 2021.



Figura 6: Logotipo del proyecto H2PiyR [5]

El proyecto se completó con 2 vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno y 10 bicicletas eléctricas con pedaleo asistido mediante pila de combustible de hidrógeno que serán los que se utilicen en las instalaciones de suministro y con fines demostrativos.

Así pues, el proyecto H2PyiR permitió a FHa disponer de una estación de recarga de hidrógeno, también conocida bajo el término de hidrogenara, en sus instalaciones que tendría, en primer lugar, un propósito científico de obtención de datos y para comprobar la viabilidad de la tecnología de hidrógeno y, en segundo lugar, podría satisfacer la demanda de combustible de aquellos vehículos que utilicen el hidrógeno para su propulsión de manera gratuita, bajo las restricciones estipuladas por la propia FHa debidas a la cantidad de hidrógeno disponible y a la producción del mismo.

Del mismo modo, FHa también pudo añadir un nuevo equipo a sus activos, el Hyundai Nexu, vehículo propulsado con motor eléctrico alimentado con pila de combustible que utiliza el hidrógeno como combustible obteniendo así la etiqueta 0 emisiones siendo el primer vehículo de su clase matriculado en España, con el propósito de que este mismo sirviera de banco de ensayos y pruebas para sacar datos y experiencias de la hidrogenara instalada en FHa.

Después de un tiempo de uso del Hyundai Nexu por los miembros de Fundación



Figura 7: Hyundai Nexu propiedad de FHa junto a la hidrogenara de 350 bar [5]

como método de transporte sostenible para dirigirse a los diferentes actos, mesas redondas y ponencias que ejecutaban y a las que eran invitados se percataron de que la hidrogenara que tenían instalada, con una presión máxima de 350 bares, realizaba una carga parcial del depósito del vehículo repostándolo hasta la mitad de su capacidad, reduciendo también su autonomía a la mitad, haciéndolo pasar por la hidrogenara con mayor frecuencia de la esperada.

En vista de esta problemática, desde FHa y con la ayuda del Plan Complementario de Energía e Hidrógeno Renovable impulsado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, actual Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, se decide lanzar un proyecto para renovar las instalaciones de la hidrogena, pasando así de surtir hidrógeno a una presión de 350 bar a surtirlo a una presión de 700 bar, pudiendo repostar el Hyundai Nexa de un estado de medio depósito a un estado de repostaje completo. [5]

Proyecto LA6.A3 Reacondicionamiento de la HRS de WALQA a 700 bar

Este proyecto se enmarca en el Plan Complementario de Energía e Hidrógeno Renovable en el que participa Aragón. Los Planes Complementarios son un instrumento del MICINN dirigido a establecer colaboraciones con las CCAA en acciones de I+D+I que tengan objetivos comunes basados en intereses reflejados en la Estrategia de Especialización Inteligente, RIS3, estatal y autonómica.

Dentro del Plan Complementario de Energía e Hidrógeno Renovable, este proyecto se desarrolla en la Línea de Actuación 6, Desarrollo de sistemas para el almacenamiento a presión y suministro de hidrógeno verde.

El objetivo principal del proyecto LA6.A3 Hidrogena 700 es el reacondicionamiento de la estación de recarga de hidrógeno situada en las instalaciones de la Fundación hidrógeno Aragón en el Parque Tecnológico Walqa, incrementando la presión de dispensación a vehículos ligeros hasta 700 bares, y permitiendo recarga de vehículos pesados a 350 bar. Complementariamente a este objetivo, la nueva instalación tiene que permitir el testeo de ciertos componentes y procesos, de forma que se convierta en una plataforma de desarrollo de las tecnologías implicadas.

De forma específica, se establecen los siguientes objetivos parciales:

1. Elaboración estudio básico de reacondicionamiento.
2. Desarrollo de la solución identificada en el estudio básico, con especificaciones de la instalación.
3. Lanzamiento de compras de componentes.
4. Montaje de la instalación.
5. Puesta en servicio de los equipos y sistemas instalados durante el montaje.
6. Monitorización de la instalación.

7. Elaboración del manual de operación y mantenimiento de la instalación.

[6]

Poder dar apoyo para cumplir el quinto objetivo de la lista es el principal motivo por el cual se elabora este documento.

Descripción general de la instalación existente en FHa

Las hidrogeneras se clasifican en función del tipo de suministro, que puede ser con gasoductos, con hidrógeno comprimido o hidrógeno criogénico, y según la presión de dispensación, habitualmente a 350 bar o 700 bar.

Se pueden clasificar también en dos tipos según la procedencia del hidrógeno dando lugar a hidrogeneras centralizadas y a hidrogeneras descentralizadas, en la producción centralizada, el hidrógeno se produce a gran escala en instalaciones industriales alejadas del centro de distribución y éste es transportado hasta las estaciones de servicio, ya sea a través de una red de tuberías o mediante camiones con tubos con gas comprimido. En la producción descentralizada, el hidrógeno se produce en las propias instalaciones por lo que se ahorra la etapa de transporte del hidrógeno a otra ubicación. [7]

Además, se podrían clasificar también según el método de producción del hidrógeno. El primer método es el reformado con vapor del gas natural, a menudo conocido como Reformado de Metano con Vapor (SMR), en este caso, el vapor y el gas natural se calientan juntos a alta presión a $\sim 900^{\circ}\text{C}$ sobre un catalizador a base de níquel. El resultado es una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno. El segundo método que se está promoviendo con fuerza es la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua. De este modo, todos los procesos de producción de hidrógeno pueden caracterizarse asignando al hidrógeno una etiqueta de color. Aunque el hidrógeno es un gas incoloro, estas etiquetas son de uso común como notación abreviada. [8]

Colores del hidrógeno	Método de producción
Hidrógeno gris	Mediante el reformado de metano con vapor y el CO ₂ producido se libera a la atmósfera
Hidrógeno azul	Mediante el reformado de metano con vapor, pero el CO ₂ se captura y almacena
Hidrógeno verde	Mediante la electrólisis del agua utilizando la electricidad obtenida de una fuente renovable como la eólica o la solar.
Hidrógeno rosa	Mediante la electrólisis del agua cuando la electricidad procede de la energía nuclear
Hidrógeno negro/marrón	A partir del carbón mediante la gasificación, pero es un proceso muy contaminante ya que se libera CO ₂ a la atmósfera.

Tabla 1. Colores del hidrógeno [8]

El abastecimiento de hidrógeno a la hidrogenera se puede realizar mediante tres diseños principalmente: compresión directa, compresión directa con acumulador y compresión en cascada. Estos diseños ofrecen ventajas y desventajas. [9]

	Directa	Directa con acumulador	En cascada
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • No hay tiempo de recuperación de la estación entre repostajes. • No requiere de un sistema de almacenamiento a alta presión. • Menos complejidad en comparación con el sistema en cascada. • El trabajo realizado por el compresor es el necesario para alcanzar la presión requerida. 	<ul style="list-style-type: none"> • No hay tiempo de recuperación de la estación entre repostajes. • Se requiere solo un tanque a alta presión (acumulador). • Menos complejidad en comparación con el sistema en cascada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología madura. • Sistema de control simple. • Permite un suministro continuo de hidrógeno a alta presión, incluso en cortes de suministro eléctrico. • Requiere un compresor más pequeño en comparación a los otros diseños.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Compresores grandes superiores a los disponibles comercialmente. • Se requiere un sistema de control complejo. • No es posible repostar vehículos si se produce un corte en el suministro eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Compresores grandes superiores a los disponibles comercialmente. • Se requiere un sistema de control complejo. • No es posible repostar vehículos si se produce un corte en el suministro eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Compresiones con consumo adicional de energía. • Sistema complejo con muchos componentes. • Tiempo de recuperación entre ciclos de repostaje. • Mayores medidas de seguridad. • Mayor coste de los tanques de almacenamiento.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los diseños de compresión [9]

FHa cuenta con una hidrogenera descentralizada con suministro de hidrógeno comprimido generado mediante electrolisis, hidrógeno verde, y abastecimiento por compresión en cascada.

Los principales componentes de las hidrogeneras son: compresores, tanques de almacenamiento, dispensadores y sistemas de refrigeración. El funcionamiento de una hidrogenera se puede dividir en tres etapas principalmente: suministro, proceso de abastecimiento y dispensación.

Para describir los distintos componentes y el funcionamiento de la hidrogenera nos apoyaremos en la siguiente figura.

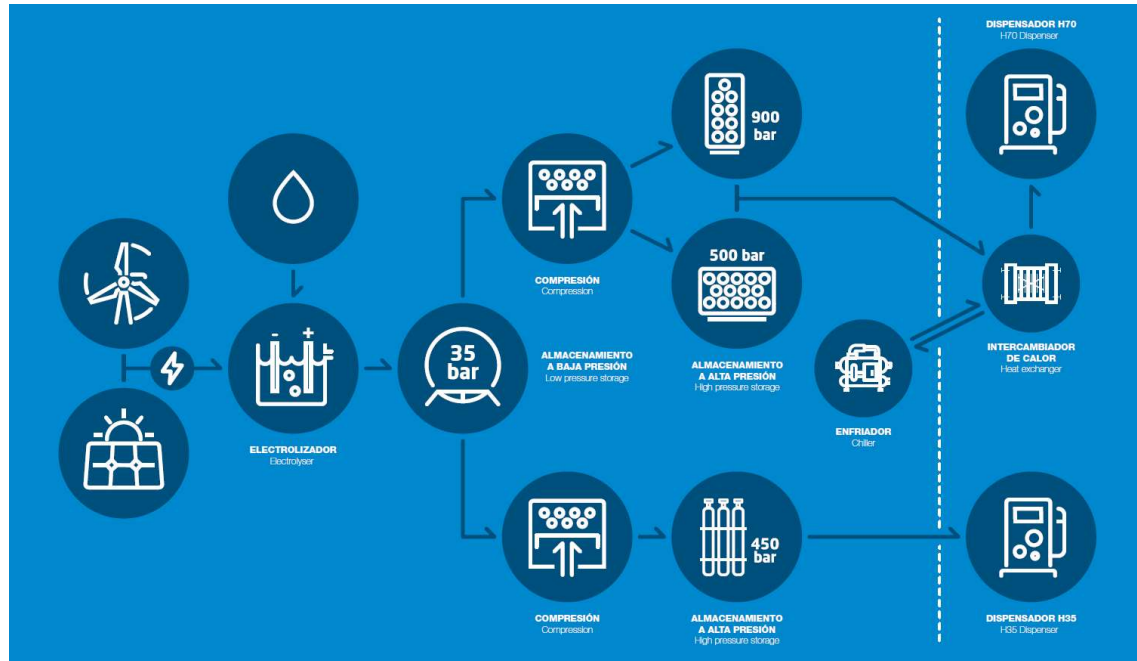


Figura 7: Esquema de componentes de la hidrogenera existente en instalaciones de FHa

En la etapa de suministro, se produce electricidad en el parque eólico, que cuenta con tres aerogeneradores con una potencia de 650 kW en total, y en el parque fotovoltaico, que cuenta con hasta 170 kW repartidos entre varios seguidores y huertas solares. La electricidad es direccionada hacia el electrolizador, pasando previamente por inversores y transformadores de tensión, para poder producir de esta manera hidrógeno verde.

También es necesario suministrar agua desmineralizada al electrolizador para poder llevar a cabo la electrolisis, según el modelo de electrolizador también podría ser necesario alimentarlo con hidróxido potásico.

En el método actual de producción el hidrógeno se produce en el electrolizador de la marca Enapter, modelo EL2.1 versión 2.



Figura 8: Módulo electrolizador de la marca Enapter, modelo EL2.1 versión 2 en instalaciones de FHa

El hidrógeno producido a 35 bar es almacenado en el depósito pulmón, o buffer, de 4000 litros de capacidad el cual servirá de suministro tanto para los puntos de consumo en taller como para el posterior almacenamiento en media y alta presión.



Figura 9: Depósito pulmón, buffer, en instalaciones de FHa

FHa cuenta con dos tipos de dispensador, el más antiguo con dispensación a 350 bar y el nuevo modelo que está en instalación con dispensación a 700 bar.



Figura 10: A la izquierda, dispensador antiguo de 350 bar. A la derecha, nuevo modelo de dispensador de 700 bar. Ambos en instalaciones de FHa

En el modelo con dispensación a 350 bar, el hidrógeno que se vaya a destinar para combustible de automoción debe ser almacenado en alta presión, para lo cual se dispone de un compresor alternativo de desplazamiento positivo de diafragma de dos etapas de la marca Hoffer, modelo MKZ 120-15/100-40, que elevará la presión del gas hasta 450 bar.



Figura 11: Compresor Hoffer modelo MKZ 120-15/100-40 en instalaciones de FHa

El hidrógeno será almacenado en un bloque de botellas apto para esa presión de almacenamiento con una capacidad máxima de 50 kg.



Figura 12: Bloque de botellas para almacenamiento de hidrógeno a 350 bar en instalaciones de FHa

En el modelo con dispensación a 750 bar, el hidrógeno que de la misma manera se vaya a destinar para combustible de automoción pasará por otro compresor distinto al del modelo anterior, siendo un compresor también alternativo de desplazamiento positivo de diafragma de dos etapas, esta vez de la marca PDC modelo PDC-3-6000/15000(100) y éste lo comprimirá a 500 bar o a 900 bar.



Figura 13: Compresor PDC modelo PDC-3-6000/15000(100) en instalaciones de FHa

El hidrógeno comprimido pasa al depósito de media presión (500 bar) o al depósito de alta presión (900 bar), los volúmenes de estos almacenamientos son de:

- 550 litros, con una masa total de hidrogeno de 26 kg para el almacenamiento de 900 bar
- 1166 litros, con una masa total de hidrogeno de 37 kg, para el almacenamiento de 500 bar.



Figura 15: Bloque de botellas para almacenamiento de hidrógeno a 500 bar en instalaciones de FHa



Figura 14: Bloque de botellas para almacenamiento de hidrógeno a 900 bar en instalaciones de FHa

La dispensación del hidrógeno vendrá caracterizada por su duración y por las variaciones de la presión y la temperatura que puedan darse en dicho intervalo.

Uno de los factores más importantes a considerar durante la dispensación es el proceso de expansión del hidrógeno, ya que conlleva a un aumento de la temperatura explicado gracias al efecto de Joule-Thomson o efecto Joule-Kelvin.

En el efecto de Joule-Thomson o efecto Joule-Kelvin se define un coeficiente que depende del gas específico, de la temperatura y de la presión del gas antes de la expansión o compresión, dependiendo del signo del coeficiente a la temperatura inicial hará que un gas aumente, disminuya o quede invariable su temperatura en una expansión adiabática.

En el caso del hidrógeno éste coeficiente es negativo lo que hace que la temperatura aumente en el caso de sufrir una expansión adiabática, al contrario que la mayoría de los gases de la naturaleza.

La razón física detrás de este fenómeno es porque durante las colisiones entre los átomos en la expansión, la energía cinética es convertida en energía potencial temporalmente. Esto conlleva que una caída en la densidad signifique una caída en el número de colisiones por unidad de tiempo, y por lo tanto, una disminución de la energía

potencial, que debido a la conservación de la energía a su vez conduce a un aumento de la energía cinética, y por lo tanto, de la temperatura. En el caso del hidrógeno, la conversión de energía potencial en energía cinética supera con creces el aumento de energía potencial debido a las fuerzas electromagnéticas.

Teniendo esto en cuenta, la dispensación de hidrógeno lleva consigo un aumento en la temperatura de dicho gas, lo que implica, un aumento de temperatura en el depósito del vehículo. La normativa actual exige que la temperatura del depósito del vehículo no supere los 80°C [10]. Para conseguir que el depósito no alcance dicha temperatura, lo que se pretende es enfriar todo lo posible el hidrógeno mediante “chillers” o enfriadoras antes de introducirlo en el depósito, así aun con el aumento de temperatura debido a la expansión se logra que el gas no alcance la temperatura exigida por normativa.

En Fundación Hidrógeno Aragón se ha optado por instalar una planta enfriadora comercial de la empresa Intarcom, modelo ECO₂CUBE, que utiliza como refrigerante modelo R-744 (CO₂) pudiendo alcanzar un rango de temperaturas de refrigeración de los -40°C hasta los 85 °C.



Figura 16: Enfriadora de Intarcom, modelo ECO₂CUBE, en instalaciones de FHa

En el caso que estamos estudiando se utilizará para alcanzar la temperatura más baja del rango para poder contrarrestar, como ya se ha nombrado anteriormente, el aumento de temperatura debido a la expansión.

La disposición de todos los equipos descritos anteriormente está reflejada en el Plano 1 incluido en el Anexo.

Objetivo

El electrolizador que impera en la producción de hidrógeno para la hidrogenera de dispensación a 350 bar es el electrolizador de la marca Enapter, modelo EL2.1 versión 2. Siendo la siguiente figura un modelo simplificado del proceso.

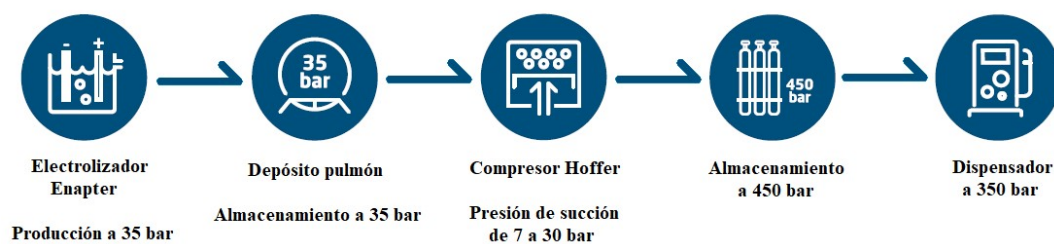


Figura 17: Modelo simplificado del proceso de producción del electrolizador Enapter para la hidrogenera con dispensación a 350 bar

Incluso para la hidrogenera de dispensación a 700 bar serviría este mismo electrolizador dejando la producción como el siguiente modelo simplificado.

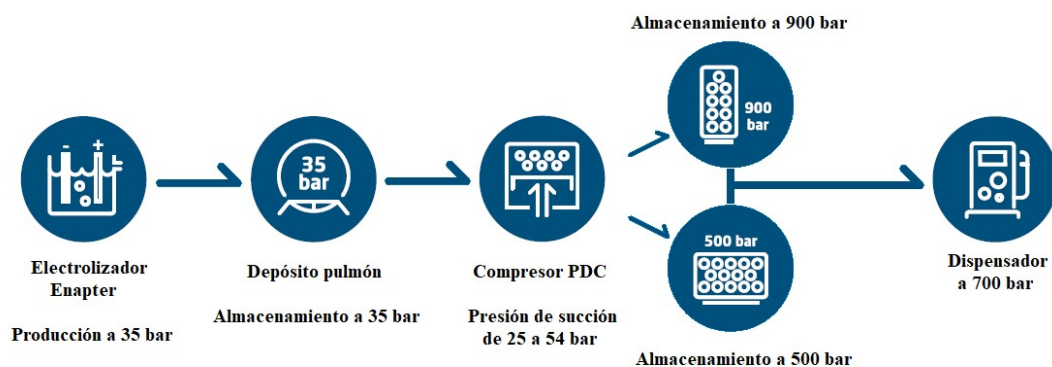


Figura 18: Modelo simplificado del proceso de producción del electrolizador Enapter para la hidrogenera con dispensación a 700 bar

Este electrolizador utiliza la tecnología AEM, por sus siglas en inglés, Anion Exchange Membrane Water Electrolyzers, el potencial de esta tecnología es que permite utilizar catalizadores de metales no nobles y componentes sin titanio, en definitiva, una tecnología más barata de llevar a cabo.

Por contraparte, la no utilización de metales nobles en los catalizadores hace que el desgaste de la membrana sea excesivo por el funcionamiento normal, dando muchos problemas de funcionamiento y paradas en la producción debido al desgaste.

La experiencia de FHa con este electrolizador no es satisfactoria para su uso a medio plazo, ya que se han experimentado una gran cantidad de periodos con diversos malfuncionamientos y una degradación acelerada en su componente principal, el stack. Por esa razón Fundación Hidrógeno Aragón está evaluando alternativas para la producción de hidrógeno, y se plantea el estudio de uso de otro electrolizador que se encuentra en sus instalaciones, en este caso el electrolizador de la marca McPhy, modelo Piel by McPhy, Rev: 1.03.



Figura 19: Módulo electrolizador McPhy, modelo Piel by McPhy, Rev: 1.03 en instalaciones de FHa

El electrolizador de la marca McPhy utiliza la tecnología alcalina convencional, muchísimo más instaurada en el tiempo por su longevidad comparada con la tecnología AEM, y por lo tanto más fiable a la hora de tener una producción fija en el tiempo. Además, en este caso, el electrolizador McPhy es capaz de producir 5 veces más hidrógeno que el electrolizador Enapter, con el contrapunto de que, en vez de ser producido a 35 bares de presión, McPhy lo produce a 8 barg, lo que se traduce a una presión absoluta de 9 bares.

Para conocer más sobre el funcionamiento de la tecnología de estos electrolizadores, se ofrece información extendida sobre su funcionamiento en el Anexo en el apartado Estado del arte de la electrólisis.

Continuando con la explicación, no habría problema en sustituir a Enapter por McPhy, si solo se tratara de alimentar a la hidrogenera de 350 bares de dispensación, porque la presión a la que es capaz de succionar el compresor Hoffer de ese surtidor sería suficiente como se muestra en la siguiente figura.

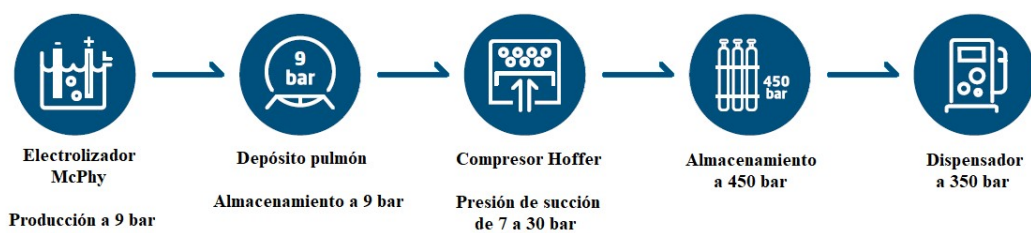


Figura 20: Modelo simplificado del proceso de producción del electrolizador McPhy para la hidrogenera con dispensación a 350 bar

Habría que calcular en detalle para saber cómo afecta en los tiempos de producción el cambio de un electrolizador por el otro, pero no existe una barrera técnica que lo impidiera.

El problema reside en que cuando se intenta utilizar este electrolizador para alimentar la hidrogenera con dispensación a 700 bar, ya que el compresor de esta instalación requiere como mínimo una presión de succión de 25 bar, y como se ha indicado previamente, McPhy produce a 9 bar. Adicionalmente, si el depósito se encontrase a una presión mayor a 9 bar e inferior a 24 bar, no sería posible ni volcar la producción contra él ni comprimir el hidrógeno restante en el depósito pulmón, dejando el depósito para el uso exclusivo de los distintos bancos de ensayos del taller.

Como se puede apreciar en la siguiente imagen, la presión máxima de producción del electrolizador y la presión mínima de succión del compresor no concuerdan, no siendo posible de esta manera el uso de este electrolizador.

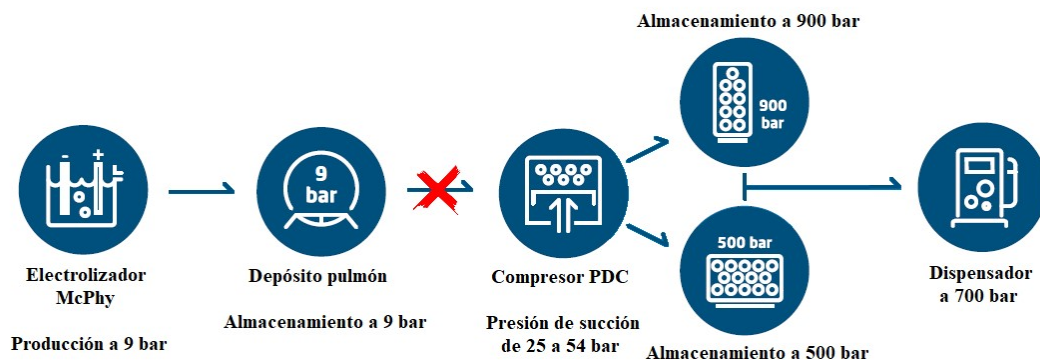


Figura 21: Modelo simplificado del proceso de producción del electrolizador McPhy para la hidrogenera con dispensación a 700 bar

Cómo aumentar la presión de la producción del electrolizador McPhy para que pueda alimentar al compresor PDC será la solución a encontrar.

Para ello, Fundación Hidrógeno Aragón propone utilizar otro compresor con el que cuenta en sus instalaciones, de la marca Haskel, modelo 8AGD-5, que actualmente se encuentra en desuso, con una relación de compresión de 5 a 1, pudiendo elevar la presión del depósito pulmón de los 9 bares hasta unos 45 bares, por lo tanto, podría ser la solución que se está buscando.

Se proponen métodos para el electrolizador McPhy, con distintas configuraciones con el fin de ver la viabilidad de uso de dicho compresor, se proponen además métodos alternativos para el electrolizador Enapter para poder comparar.

Instalación de redes necesarias para el funcionamiento

Las instalaciones necesarias para el equipamiento del taller contemplan tanto las redes de hidrógeno como otras redes auxiliares necesarias para el desarrollo de la actividad posterior y que se recogen a continuación:

- Red de hidrógeno en Alta Presión (900 bar)
- Red de hidrógeno en Media Presión (350 bar)
- Red de hidrógeno en Baja Presión (30 bar)
- Red de oxígeno en Baja Presión (30 bar)
- Red de potasa (30 bar)
- Red de nitrógeno (10 bar)
- Red de Aire Comprimido (10 bar)
- Red de tuberías de venteo (presión atmosférica)

Redes de Hidrógeno

Las redes de hidrógeno se extienden por todo el recinto del taller y la zona exterior y se encargan de transportar este gas desde el punto de generación hasta el almacenamiento y puntos de consumo.

El proceso que sigue el hidrógeno se puede dividir en varias etapas:

Producción de hidrógeno, etapa en la cual mediante el proceso de electrólisis se generará hidrógeno a partir de agua y electricidad generada mediante energías renovables presentes en la actual instalación.

Almacenamiento a baja presión, el hidrógeno generado se almacenará en un depósito pulmón a 30 bar de 4000 litros de capacidad, el cual servirá de suministro tanto para los puntos de consumo en taller como para el posterior almacenamiento en alta presión.

Almacenamiento a media y alta presión, el hidrógeno que se vaya a destinar para combustible de automoción debe ser almacenado en alta presión, para lo cual se dispone de dos compresores que elevarán la presión del gas hasta 350 bar, 500 bar y 900 bar

siendo almacenada cada presión en un bloque de botellas apto para esa presión de almacenamiento.

Utilización del hidrógeno, el hidrógeno en Baja Presión se distribuirá hasta los puntos de bancos de ensayo mediante una red a 30 bar. En cada banco de ensayo se dispondrá de un reductor para ajustar la presión del hidrógeno a la de trabajo de forma segura.

En toda la instalación se dispondrá de un sistema de control que permita la operación de una forma segura y fiable, además de las protecciones y elementos de seguridad indicados en la legislación actual para tales efectos.

Red de Oxígeno

El oxígeno se obtiene como un subproducto de la electrólisis del agua al igual que el hidrógeno. Dada la escasa cantidad del gas no está prevista la utilización del mismo, por lo que este se conduce directamente al exterior para su venteo mediante una red exclusiva de oxígeno diseñada para una presión máxima de 30 bar.

Red de Potasa

El proceso de generación de hidrógeno se podría realizar a través de un electrolizador alcalino, el cual utiliza una disolución de potasa como electrolito para la reacción química que produce el hidrógeno. Si bien el electrolizador se entiende como un equipo en su conjunto, ciertas tuberías transportan en su interior una mezcla de potasa líquida y gases (hidrógeno y oxígeno) a 30 bar de presión hasta los separadores finales donde la potasa recircula en su circuito cerrado. Esta pequeña parte de la instalación se le ha denominado Red de potasa y se considera como una red a presión más de la instalación.

Red de Nitrógeno

Distribuida por toda la instalación se ubica una red de nitrógeno a 10 bar, con objeto de poder disponer de un gas inerte para venteos y limpiezas de la red en cualquier punto de la instalación. El nitrógeno gas se suministra mediante unas botellas ubicadas en el recinto exterior. Estas botellas son alquiladas a un gasista, el cual es dueño de las

mismas y se encarga de su reposición, suministrando nuevas botellas cuando éstas se vacían. Los bloques de botellas por esta razón, no se consideran parte de la instalación.

Red de Aire comprimido

Se ha ubicado igualmente una red de suministro de aire comprimido por todo el taller, para el suministro a los diferentes puntos de consumo.

Red de tuberías de venteo

Se ha instalado una red de tuberías de venteo las cuales tienen como único objetivo el comunicar la salida de los gases desde cualquier banco de ensayo hasta el exterior del edificio. Se han diseñado para que se encuentren permanentemente a presión atmosférica.

Materiales

A lo largo de las diferentes partes de la instalación se va a trabajar con gas a presión, con lo que es necesario disponer de una instalación adecuada que sea diseñada para soportar presiones máximas de 900 bar, y temperatura máxima de 100 °C

Todos los materiales utilizados serán apropiados para el servicio con Hidrogeno, Nitrógeno y Oxígeno y para las presiones y temperaturas indicadas, y cumplirán con las exigencias mínimas marcadas por la normativa en vigor.

Toda la red de tuberías será aérea y se utilizaran tuberías de alta calidad de acero inoxidable sin soldadura, calidad ASTM A269 – A312 TP 316L, para minimizar la posibilidad de ignición debido a partículas de corrosión atmosféricas.

Normativa y legislación aplicable

Para la ejecución completa de las instalaciones, además de las Ordenanzas y Reglamentos que por su ubicación le afecten, se tendrán en cuenta las siguientes disposiciones legales:

Normativa Europea

1. **Reglamento 1907/2006** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006, (**Reglamento REACH**): Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y preparados químicos.
2. **Reglamento 1272/2008** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, (**Reglamento CLP**): Clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, incluyendo el hidrógeno.
3. **Directiva 2012/18/UE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, (**Directiva SEVESO III**): Relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves con sustancias peligrosas, incluido el hidrógeno.
4. **Directiva 2014/34/UE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014, (**Directiva ATEX**): Regula los equipos y sistemas de protección destinados a ser utilizados en atmósferas potencialmente explosivas.

Normativa Nacional

1. **Real Decreto 2085/1994**, de 20 de octubre (**Reglamento de Instalaciones Petrolíferas**): Aunque principalmente destinado a hidrocarburos, también puede ser aplicable a ciertas instalaciones de hidrógeno.
2. **Real Decreto 842/2002**, de 2 de agosto (**Reglamento electrotécnico para baja tensión**): Establece las condiciones técnicas y garantías que deben reunir las instalaciones eléctricas conectadas a una fuente de suministro en los límites de baja tensión.
3. **Real Decreto 681/2003**, de 12 de junio: Determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades preciso para establecer un adecuado nivel de protección de la

salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

4. **Real Decreto 2267/2004**, de 3 de diciembre (**Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales**): Establece y define los requisitos que deben satisfacer y las condiciones que deben cumplir los establecimientos e instalaciones de uso industrial para su seguridad en caso de incendio, para prevenir su aparición y para dar la respuesta adecuada, en caso de producirse, limitar su propagación y posibilitar su extinción, con el fin de anular o reducir los daños o pérdidas que el incendio pueda producir a personas o bienes. Aplicable a almacenes de hidrógeno.
5. **Real Decreto 314/2006**, de 17 de marzo (**Código Técnico de la Edificación**): Por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad.
6. **Real Decreto 840/2015**, de 21 de septiembre: Establece medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
7. **Real Decreto 144/2016**, de 8 de abril: Establece los requisitos esenciales de salud y seguridad exigibles a los aparatos y sistemas de protección para su uso en atmósferas explosivas.
8. **Real Decreto 513/2017**, de 22 de mayo (**Reglamento de instalaciones de protección contra incendios**): Contempla todos los aspectos a tener en cuenta en relación con el diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas de protección activa contra incendios.
9. **Real Decreto 656/2017**, de 23 de junio (**Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus instrucciones técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10**): Establece las condiciones de seguridad para el almacenamiento de productos químicos peligrosos, incluido el hidrógeno (APQ 5).
10. **Real Decreto 809/2021**, de 21 de septiembre (**Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias**): Establece los requisitos técnicos y de seguridad para las instalaciones de gases combustibles, tanto en lo que se refiere a su diseño, construcción y puesta en servicio, como a su mantenimiento y explotación.

Normas Técnicas y Guías, disposiciones no obligatorias

1. **ISO 15916:** Consideraciones básicas de seguridad de los sistemas de hidrógeno.
2. **UNE-EN 1797:** Normas para sistemas de abastecimiento de hidrógeno.
3. **UNE-EN ISO 19880-1:2018:** Directrices para estaciones de servicio de hidrógeno.
4. **UNE-EN ISO 14687:2019:** Correspondiente a “Hidrógeno como combustible. Especificaciones de producto” establece las especificaciones de calidad del hidrógeno.
5. **Guía Técnica del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE):** Directrices y buenas prácticas para la producción, almacenamiento y utilización del hidrógeno.
6. **IGC Doc. 121/04/E,** normativa de la Asociación Europea de Gases Industriales (EIGA) correspondiente a “Conducciones de transporte de hidrógeno”.
7. **IGC Doc. 15/06/E,** normativa de la Asociación Europea de Gases Industriales (EIGA) correspondiente a “Estaciones de hidrógeno gaseoso”.
8. **IGC Doc. 134/2,** normativa de la Asociación Europea de Gases Industriales (EIGA) correspondiente a “Atmósferas explosivas ATEX”.

Metodología

Se compara el funcionamiento y requerimientos tanto del electrolizador de la marca Enapter, modelo EL2.1 versión 2, como del electrolizador de la marca McPhy, modelo Piel by McPhy, Rev: 1.03.

Por extensión y por complejidad, no se aborda el diseño de todas las redes a las distintas presiones necesarias para el completo funcionamiento de la instalación, el cálculo y diseño se centrará en la red de hidrógeno de baja presión (30 bar), intentando priorizar el uso de componentes ya existentes en las instalaciones.

Se comprobará si alguno de los dos electrolizadores es capaz de mantener una producción simultánea a la compresión del compresor PDC que permita producir y a su vez comprimir contra el almacenamiento final.

Al comprobar que no es posible la producción en continuo se proponen metodologías alternativas tanto para el electrolizador Enapter como para el electrolizador McPhy para poder comparar entre ellas los resultados obtenidos.

Electrolizador Enapter

Se proponen dos métodos como alternativa a la productividad simultánea con el compresor PDC.

Primer método: Producción contra depósito pulmón

En el primer método habrá que esperar a que el compresor PDC termine de comprimir para que el módulo Enapter comience a producir.

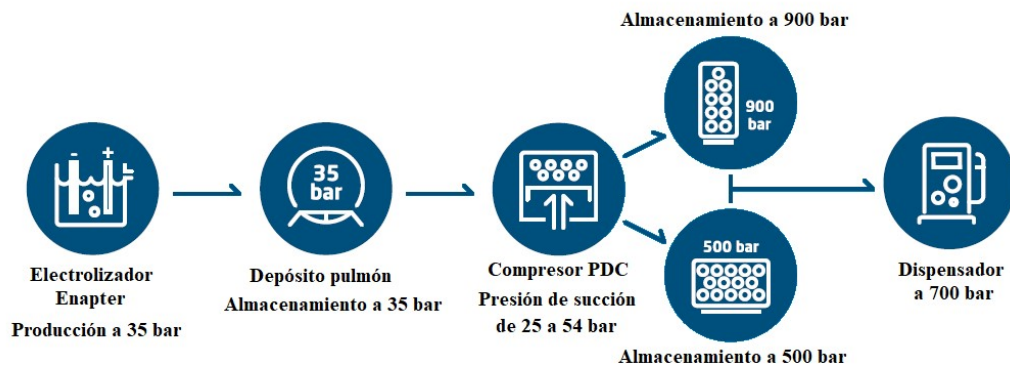


Figura 22: Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito pulmón del electrolizador Enapter

Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”

En el segundo método se sitúa un depósito entre el electrolizador y el depósito pulmón a modo de depósito “prepulmón”, que pueda albergar la producción mientras el compresor PDC comprime.

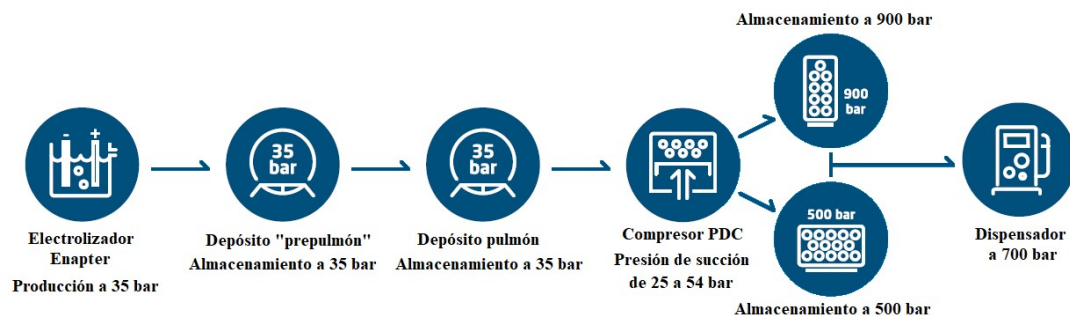


Figura 23: Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito “prepulmón” del electrolizador Enapter

Electrolizador McPhy

Esta vez, se proponen hasta cuatro métodos como alternativa a la productividad en continuo, y para comprobar la viabilidad de la instalación del electrolizador McPhy.

Primer método: Producción contra depósito pulmón

Como en el primer método de Enapter, se espera a que el compresor PDC termine de comprimir para que el módulo McPhy comience a producir.

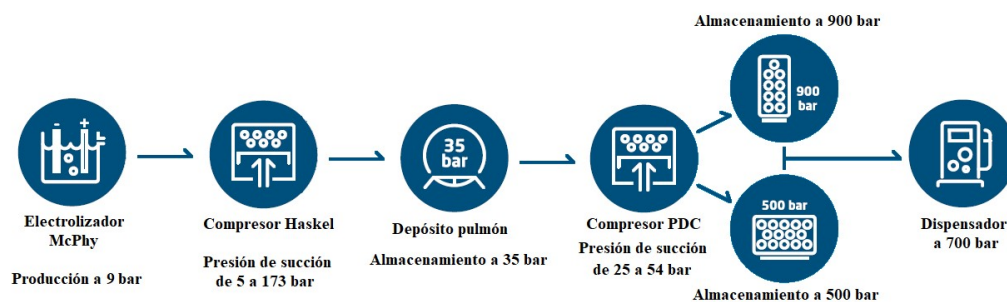


Figura 24: Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito pulmón del electrolizador McPhy

Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor

El segundo método será situar un depósito acumulador en el que se volcará la producción del electrolizador McPhy antes del compresor.

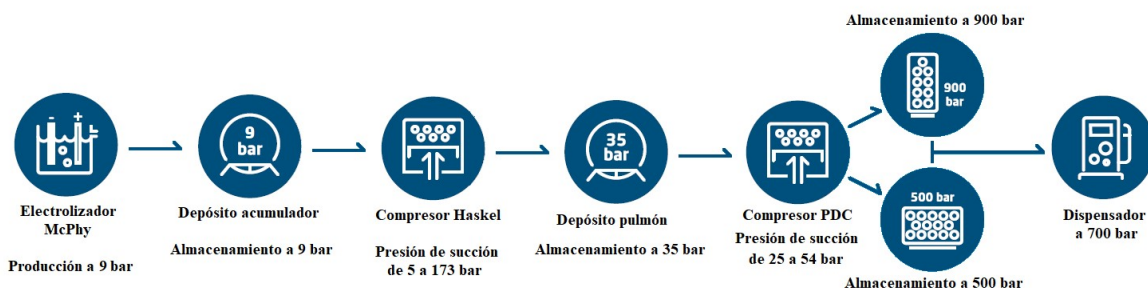


Figura 25: : Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito acumulador previo al compresor del electrolizador McPhy

Tercer método: Compresión contra depósito "prepulmón"

El tercer método consta de situar un depósito "prepulmón" entre el compresor y el pulmón e ir comprimiendo contra él.

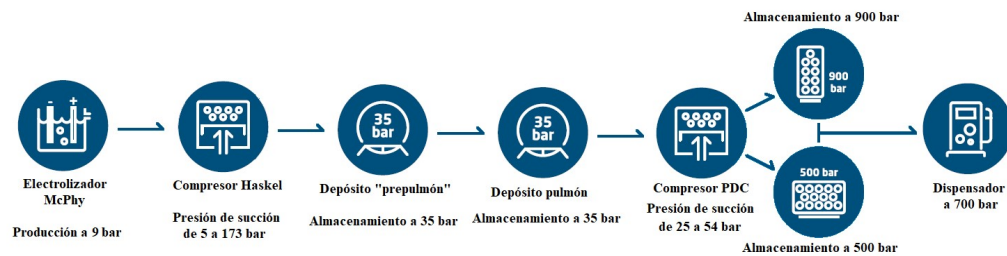


Ilustración 26: : Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito "prepulmón" del electrolizador McPhy

Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito "prepulmón"

El cuarto método será el conjunto del segundo y tercer método, así, se instala un depósito acumulador entre el electrolizador McPhy y el compresor, y otro depósito "prepulmón" entre el compresor y el depósito pulmón.

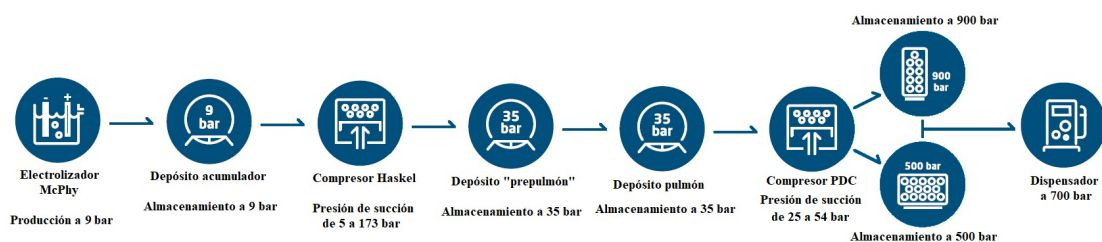


Figura 27: Modelo simplificado del proceso de producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito "prepulmón" del electrolizador McPhy

Se espera que alguno de estos métodos consiga la viabilidad de la instalación del electrolizador McPhy, y que a su vez supere la producción del electrolizador Enapter. Todos los cálculos para conseguir los costes y tiempos de producción de cada método se encuentran en el Anexo.

Conclusión y recomendaciones

Queda demostrada la viabilidad de la instalación del electrolizador alcalino McPhy, aunque esta viabilidad implique la adquisición de un depósito de hidrógeno a presión y de un compresor de aire comprimido, se otorga así la información que Fundación Hidrógeno Aragón necesitaba.

Se ofrece a su vez una tabla resumiendo con la validez de todos los métodos ofrecidos para ambos electrolizadores:

		Primer método	Segundo método	Tercer método	Cuarto método
McPhy	Descripción del método	<i>Producción contra depósito pulmón</i>	<i>Producción contra depósito acumulador previo al compresor</i>	<i>Compresión contra depósito "prepulmón"</i>	<i>Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito "prepulmón"</i>
	Validez	No	Sí	No	No
	Motivo	La producción de McPhy no es constante, por lo el compresor Haskel no tendría un flujo continuo de aspiración	Ofrece tiempos de producción coherentes	La producción de McPhy no es constante, por lo el compresor Haskel no tendría un flujo continuo de aspiración	Elevadísimo número de iteraciones para igualar la presión entre el depósito pulmón y el depósito "prepulmón".
Enapter	Descripción del método	<i>Producción contra depósito pulmón</i>	<i>Producción contra depósito "prepulmón"</i>		
	Validez	Sí	No		
	Motivo	Ofrece tiempos de producción coherentes	Elevadísimo número de iteraciones para igualar la presión entre el depósito pulmón y el depósito "prepulmón".	-	-

Tabla 3: Resumen validez de los métodos propuestos para cada electrolizador

Se comparan los resultados finales obtenidos en el Anexo de los electrolizadores Enapter y McPhy de coste total y tiempo total de la producción.

En el coste total se incluye la adquisición de equipos y el coste de mantener en marcha los electrolizadores para producir el hidrógeno necesario.

El tiempo total de producción será la suma del tiempo que le cueste a cada electrolizador producir 6,26 kg de hidrógeno, que son los necesarios para surtir una recarga completa del vehículo Hyundai Nexa, más el tiempo necesario para comprimir esa cantidad hasta los 900 bar.

Con el primer método propuesto para el electrolizador Enapter de producción contra depósito pulmón y el segundo método propuesto para el electrolizador McPhy de producción contra depósito acumulador previo al compresor, escogiendo un depósito acumulador de 1 m³, se obtiene:

Electrolizador McPhy	Volumen depósito acumulador (m ³)	1
	Coste total (€)	6.861,84
	Tiempo total de la producción (h)	9,47
Electrolizador Enapter	Coste total (€)	246,86
	Tiempo total de la producción (h)	44,18

Tabla 4: Comparación de los resultados obtenidos para ambos electrolizadores

Como se puede observar, al final, como ya se pronosticaba, el electrolizador McPhy tiene una producción 5 veces mayor que el electrolizador Enapter, y a su vez el tiempo total de producción también lleva esa ratio, en este caso de división, a favor del electrolizador McPhy. Se compara la cantidad producida en el mismo tiempo en la siguiente tabla:

Electrolizador McPhy	Hidrógeno producido en 9,47 h (kg)	6,26
Electrolizador Enapter	Hidrógeno producido en 9,47 h (kg)	1,68

Tabla 5: Comparación de cantidad de hidrógeno producida para el mismo tiempo entre los dos electrolizadores

El coste total de la instalación del electrolizador McPhy es superior al del funcionamiento del electrolizador Enapter debido a la adquisición de equipos auxiliares para su funcionamiento, de no ser por este hecho, de no ser por este hecho, el coste

energético de la producción de hidrógeno del electrolizador McPhy es menor comparada con el del electrolizador Enapter:

Electrolizador McPhy	Coste energético (€)	59,84
Electrolizador Enapter	Coste energético (€)	246,86

Tabla 6: Comparación de costes energéticos para ambos electrolizadores

Consideraciones a tener en cuenta, los tiempos de producción calculados en el Anexo son una mera estimación y podrían no ceñirse a la realidad, ya que, para los electrolizadores, los datos usados son las características de los electrolizadores completamente nuevos, no teniendo en cuenta el desgaste de los mismos por su funcionamiento, y para el compresor Haskell, los tiempos otorgados por la aplicación también son estimados, por lo que podrían alejarse de la realidad, aun con todo, el electrolizador McPhy seguirá teniendo un tiempo de producción menor que el electrolizador Enapter.

Para finalizar se ofrecen algunas recomendaciones de mejora que se han ido viendo con la redacción de este documento.

La primera recomendación sería, aumentar la presión y el tamaño del depósito pulmón que actualmente es de 35 bar y 4000 litros, para poder almacenar el hidrógeno suficiente como para reabastecer la recarga en una sola etapa y no en dos etapas como se está haciendo actualmente, recortando bastante el tiempo total de producción de ambos electrolizadores.

Por otra parte, se recomienda cambiar el compresor Haskell para elevar la presión del hidrógeno que funciona mediante aire comprimido, con los costes adheridos que esto conlleva como la instalación de una nueva línea de aire comprimido para alimentarlo, por otro que sea de motor eléctrico y sea la electricidad la que gobierne su funcionamiento y no el aire comprimido.

Por último, aunque esto se escape del alcance de Fundación Hidrógeno Aragón, la tecnología de los electrolizadores Enapter todavía está en fase prototipo, podría ser interesante estar al tanto de los avances que estos equipos tuvieran, incluso si llegaran a la fase comercial, para adquirir los módulos suficientes con los que satisfacer la producción cuando estos tengan menos problemas con la degradación de las membranas, pudiendo eliminar así líneas auxiliares como la línea de aire comprimido que necesita el

electrolizador McPhy para su correcto funcionamiento en estas instalaciones evitando así más focos de posibles problemas de deterioro de equipos.

Referencias

[1] Comisión Europea. (2019. 11 de diciembre). Pacto Verde Europeo (European Green Deal). Comunicación de la comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones.

[2] Comisión Europea. (2020. 8 de julio). Una estrategia del hidrógeno para una Europa climáticamente neutra (European Hydrogen Strategy). Comunicación de la comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones.

[3] FHa (2021). *Plan Director del Hidrógeno en Aragón 2021 - 2025*.

[4] FHa (2024). El patronato. En *Hidrógeno Aragón*. Recuperado de <https://hidrogenoaragon.org/es/la-fundacion/el-patronato/> en noviembre de 2024.

[5] FHa (2016). El proyecto. En *h2piyr*. Recuperado de <https://h2piyr.eu/es/inicio/>

[6] FHa (2024). LA6.A3 Hidrogenera 700. En *Hidrogeno Aragón*. Recuperado de <https://hidrogenoaragon.org/es/proyectos/la6-a3-hidrogenera-700/>

[7] Porto Mato, P. (2021). Descarbonización del sector del transporte en España con hidrógeno Verde. [Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Madrid].

[8] Kilner, J. (2022). Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. En *CICenergigune*. Recuperado de <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>

[9] Griñán Ciria, G. (2023). ¿Dónde podré llenar mi vehículo de hidrógeno y a qué precio?. En *REPSOL Fundación*. Recuperado de <https://openroom.fundacionrepsol.com/es/contenidos/donde-llenar-vehiculo-hidrogeno-precio/>

[10] Tafalla Asín, A. (2021). Estudio de un sistema de almacenamiento de gases para una hidrogenera. [Trabajo Final de Grado, Universidad de Zaragoza].

García Rodríguez, A. (2020). Estudio Tecno-Económico sobre la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera en Fundación Hidrógeno Aragón. [Trabajo Final de Master, Universidad de Zaragoza].