



Programa Europeo de Formación de Formadores para Equipos de Respuesta

Tema 1

Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

NIVEL I

Bombero

La información aportada en este tema está dirigida a los niveles **Bombero** y superiores.

Este tema también está disponible en los niveles II, III y IV

Este tema forma parte del conjunto de materiales formativos para los niveles I – IV: Bombero, Jefe de equipo (Oficial), Subjefe de intervención / Jefe de intervención y Técnico Asesor / Bombero Especialista. Es importante consultar el tema de introducción en el que se detalla la información relativa a las competencias y expectativas de aprendizaje

Nota: estos materiales son propiedad del Consorcio HyResponder y deben ser reconocidos como tal; se han utilizado como base los resultados de HyResponse



Descargo de responsabilidad

A pesar del cuidado que se ha puesto en elaborar este documento, se aplica el siguiente descargo de responsabilidad: la información en este documento se proporciona tal como es y no se garantiza que la información sea adecuada para un fin concreto. El usuario de la misma empleará la información por su propia cuenta y riesgo.

Este documento refleja únicamente las opiniones de los autores. La FCH JU y la Unión Europea no se responsabilizan del uso que pueda hacerse de la información aquí incluida.

Agradecimientos

El proyecto ha recibido financiación de la FCH JU (now Clean Hydrogen Partnership) en virtud del acuerdo de subvención nº 875089. La JU recibe apoyo del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 y de Reino Unido, Francia y Austria, Bélgica, España, Alemania, Italia, Chequia, Suiza y Noruega.



Resumen

Este tema incluye una introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta. El hidrógeno se ha utilizado ampliamente en la industria durante mucho tiempo como gas comprimido o en forma licuada. El hidrógeno no es más peligroso que otros combustibles comunes, pero es distinto, porque posee propiedades distintivas y riesgos asociados específicos. El uso creciente de las aplicaciones FCH requiere un profundo conocimiento de los procesos, los peligros y los riesgos, las características y los conceptos de seguridad, así como personal profesionalmente formado para hacer frente a posibles incidentes o accidentes de forma segura. Todo ello requiere un cambio significativo en la cultura de la seguridad, en especial para los equipos de primera respuesta, que serán los primeros en enfrentarse a situaciones de emergencia impliquen hidrógeno presurizado o licuado, tanto en interiores como en exteriores, en zonas residenciales urbanas, en las carreteras, en el campo y en muchos otros entornos.

En este tema se ha ofrecido una visión general de los sistemas e infraestructuras FCH. Se han estudiado los posibles peligros, riesgos, medidas de seguridad y conceptos asociados a las aplicaciones FCH, tanto fijas como de transporte. También se ofreció una visión general de los principales usos del hidrógeno, los principales métodos de producción, las opciones de almacenamiento y los modos de distribución.

Reconocemos la aportación del proyecto HyResponse, ya que los materiales aquí presentados se basan en las clases originales de HyResponse (<http://www.hyresponse.eu>).

Palabras clave

Pilas de combustible, hidrógeno, producción, almacenamiento, aplicación, seguridad del hidrógeno

Índice

Resumen	3
Palabras clave	3
1. Público destinatario	6
1.1 Descripción de funciones: Bombero	6
1.2 Nivel de competencia: Bombero	6
1.3 Conocimientos Previos: Bombero	6
2. Introducción, alcance y objetivo	6
3. Visión general de la producción, el almacenamiento y el uso industrial del H ₂	8
3.1 Producción de hidrógeno	8
3.2 Almacenamiento de hidrógeno	10
3.3 Uso de hidrógeno en la industria	12
4. Vehículos FC	13
4.1 Principales características de los vehículos de FC	14
4.2 Coches FC	14
4.2.1 Sistema de almacenamiento de hidrógeno	15
4.2.2 Sistema de suministro de hidrógeno como combustible	16
4.2.3 Sistema de FC	16
4.2.4 Sistema de propulsión eléctrica y gestión de la energía	16
4.2.5 Características y conceptos de seguridad	17
4.3 Autobuses de FC	18
4.4 Carretillas de FC	22
4.5 Aviación	23
5. Transporte de hidrógeno	25
5.1 Vehículos pesados	25
5.1.1 Camiones de gas	25
5.1.2 Camiones de líquido criogénico	27
5.2 Trenes	29
5.3 Tuberías	30
6. Aplicaciones fijas	32
6.1 Sistemas de cogeneración de calor y electricidad (CHP)	32
6.2 Generación de energía de reserva	32
7. Aplicaciones marinas	35

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

8.	Sistemas de almacenamiento energético con base de hidrógeno	39
9.	Resumen de incidentes y accidentes	43
9.1	Incidentes y accidentes en los sistemas e infraestructuras de FCH	43
9.2	Accidentes ocurridos durante la producción de hidrógeno	45
9.3	Un incidente en una estación de servicio	45
10.	Introducción al e-Laboratorio	46
	Referencias	48

1. Público destinatario

La información aportada en esta clase está dirigida al NIVEL 1: Bombero. También hay clases disponibles en los niveles II, III y IV: jefe de equipo (Oficial), subjefe de intervención / jefe de intervención y técnico asesor / Bombero especialista.

A continuación se describen las funciones, el nivel de competencia y las expectativas de aprendizaje asumidas por el Bombero.

1.1 Descripción de funciones: Bombero

El bombero es responsable y se espera que sea capaz de realizar operaciones de forma segura con Equipo de Protección Individual (EPI), incluido el Equipo de Respiración Autónoma (ERA), y utilizando el equipamiento necesario, como por ejemplo vehículos, escaleras, mangueras, extintores, equipos de comunicación y rescate, en todo tipo de condiciones climáticas y situaciones de emergencia en las que se pueda prever de un modo razonable que requerirán una respuesta.

1.2 Nivel de competencia: Bombero

Entrenado en el uso seguro y correcto de EPI, ERA y demás equipos que pueda utilizar; los primeros intervinientes deben poseer los conocimientos y práctica necesaria. Es necesario que los comportamientos que los mantendrán seguros a ellos y a otros compañeros se describan en los Procedimientos Operativos Estándar (SOP). Se requiere la capacidad práctica para evaluar de forma dinámica el riesgo para la propia seguridad y la de los demás.

1.3 Conocimientos previos: Bombero

MEC 2 Conocimientos básicos de un campo de trabajo o estudio. Habilidades cognitivas y prácticas básicas necesarias para utilizar información relevante a fin de realizar tareas y resolver problemas rutinarios utilizando reglas y herramientas sencillas. Trabajar o estudiar bajo supervisión con cierta autonomía.

2. Introducción, alcance y objetivo

Las aplicaciones de las pilas de combustible y el hidrógeno (FCH), tanto en el sector del transporte como en el de la energía, están disponibles en el mercado actual, y es muy probable que los primeros intervinientes se enfrenten a posibles accidentes/incidentes en un futuro próximo. El desarrollo de las tecnologías FCH requiere un mejor y más profundo conocimiento por parte de los primeros intervinientes de los peligros, riesgos, procesos y características de seguridad asociados a los sistemas e infraestructuras FCH. La producción de hidrógeno por electrólisis y reformado de gas natural; las aplicaciones de producción descentralizada de hidrógeno; el almacenamiento de hidrógeno gaseoso y licuado; las aplicaciones de transporte y manipulación de materiales con hidrógeno; los vehículos de FC (por ejemplo, coches, autobuses, carretillas elevadoras); las estaciones de repostaje de hidrógeno; las aplicaciones fijas de FC y los sistemas de almacenamiento de energía basados en el hidrógeno siguen siendo en gran medida desconocidos para los primeros intervinientes. Además, faltan procedimientos estandarizados de intervención en caso de accidentes o incidentes en los sistemas e infraestructuras mencionados.

El objetivo de esta clase es presentar a los equipos de respuesta una serie de aplicaciones FCH, familiarizarlos con los riesgos específicos y esbozar los principales enfoques de la ingeniería de seguridad del hidrógeno. Los intervinientes deben saber que el hidrógeno no es más o menos peligroso que cualquier otro combustible común. El hidrógeno es diferente y el conocimiento de sus propiedades específicas facilitará la toma de decisiones adecuadas en el lugar del accidente. El personal de respuesta debe recibir formación profesional que le permita trabajar con sistemas de hidrógeno a presiones de hasta 100 MPa y a temperaturas de hasta -253 °C (hidrógeno licuado), tanto en exteriores como en interiores.

Esta clase es la primera de una serie y se basa en los materiales desarrollados y proporcionados en el marco del proyecto HyResponse (<http://www.hyresponse.eu/>). En primer lugar, se elaboró un plan de estudios internacional sobre la formación en seguridad del hidrógeno para los primeros intervinientes (<http://www.hyresponse.eu/curriculum.php>). Este fue el primer paso en el establecimiento de la Plataforma Europea de Formación en Seguridad del Hidrógeno para equipos de primera intervención. Este plan de estudios se ha seguido desarrollando dentro del proyecto HyResponder (<https://hyresponder.eu>) para reflejar el estado actual de la técnica y se ha ampliado para incorporar más detalles sobre el hidrógeno licuado, los espacios cerrados, los recipientes a presión, etc.

Se anima a los alumnos a utilizar este documento como ayuda en sus estudios independientes y a buscar fuentes de información adicional.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

Al final de esta clase, los intervinientes podrán:

- Apreciar la novedad y la riqueza de las tecnologías FCH en la sociedad moderna;
- Entender el papel del hidrógeno como nuevo portador de energía;
- Nombrar las principales vías de producción, transporte, suministro y uso del hidrógeno;
- Reconocer las dificultades que plantea la percepción pública de las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible;
- Definir los principales métodos de producción industrial de hidrógeno. Aunque esta clase no está diseñada para proporcionar a los alumnos un conocimiento profundo de todos los métodos de producción, ofrece un esquema descriptivo de un reformador, de una membrana de intercambio de protones (PEM) y de los electrolizadores alcalinos, haciendo hincapié en las características y los conceptos de seguridad;
- Describir el principio de funcionamiento de una celda de combustible y de una pila de combustible (FC);
- Explicar los principios de funcionamiento y los aspectos de seguridad de una serie de aplicaciones de pila de combustible, incluyendo vehículos de FC, estaciones de repostaje, almacenamiento estacionario de hidrógeno, manipulación de materiales y las aplicaciones de distribución de hidrógeno, generación de energía de reserva y sistemas FC para la producción combinada de calor y electricidad;
- Dar ejemplos de incidentes o accidentes que puedan ocurrir en las aplicaciones FCH;

3. Visión general de la producción, el almacenamiento y el uso industrial del H₂

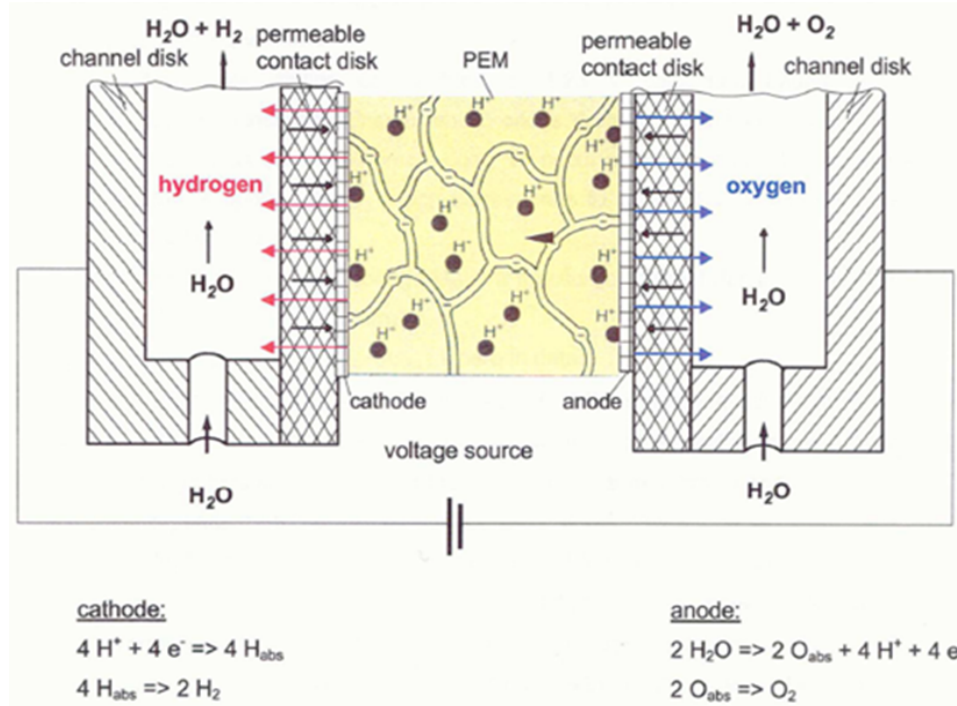
3.1 Producción de hidrógeno

Las moléculas de hidrógeno no se pueden encontrar en su forma pura en la naturaleza. Así, el hidrógeno debe producirse a partir de los compuestos en los que se encuentra, por ejemplo agua, metano, metanol, amoníaco, etanol, biomasa, etc. La producción de hidrógeno puede dividirse en dos categorías: producción centralizada a gran escala y producción descentralizada a pequeña o mediana escala. La producción centralizada se refiere a las plantas químicas establecidas a gran escala, que fabrican hidrógeno en masa, que luego se transporta a los clientes. En este caso, el hidrógeno se transporta, a veces a grandes distancias, por tuberías, por carretera o por barco. Algunos ejemplos son los grandes reformadores de vapor propiedad de las principales compañías de gas, como Air Liquide, Linde, Air Products y otras. Existen varias tecnologías consolidadas actualmente en el mercado para la producción industrial de hidrógeno. Hay dos vías comerciales para la

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

producción de hidrógeno: la electrólisis del agua (que data de finales de 1920) y las tecnologías de reformado (introducidas en 1960).

La electrólisis del agua es un proceso en el que el agua se divide en hidrógeno y oxígeno utilizando energía eléctrica (1):



Fuente: Areva, 2015.

Figura 1 Principios de funcionamiento del electrolizador PEM.

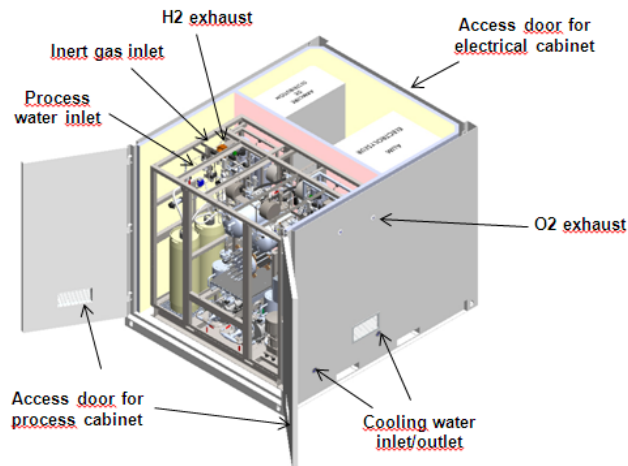
El mecanismo de la electrólisis del agua basado en la membrana de intercambio de protones (PEM) se muestra en la Figura 1. En la electrólisis del agua PEM, el agua se divide electroquímicamente en hidrógeno en el cátodo y en oxígeno en el ánodo, respectivamente. Durante el funcionamiento del electrolizador de agua PEM, el agua se bombea a los canales del ánodo, donde se divide en oxígeno, protones y electrones. Los protones viajan a través de la PEM intercalada entre el ánodo y el cátodo y llegan al lado del cátodo. Los electrones viajan desde el ánodo hasta el cátodo a través del circuito de alimentación externo, que proporciona la fuerza motriz, es decir, el voltaje de la célula, para la reacción. En el cátodo, los protones y los electrones se recombinan para producir hidrógeno.

¹ Channel disk: disco del canal. Permeable contact disk: disco permeable en contacto. Cathode: cátodo. Anode: ánodo. Voltage source: fuente de tensión.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

La formación de un ATEX de hidrógeno-oxígeno en el separador puede deberse a un mal funcionamiento de la línea de transferencia de agua o una perforación de la membrana. Para evitar un evento ATEX en el separador, se consideran las siguientes medidas de seguridad:

- imponer un nivel mínimo de agua en el separador de gas superior al 55% de su altura;
- controlar el nivel de agua en los separadores de gases H₂ y O₂;
- controlar la presión y la diferencia de presión entre las líneas de H₂ y O₂;
- controlar la concentración de hidrógeno en la salida del separador de gas oxígeno.



2

Figura 2 El esquema de un electrolizador PEM [1]

3.2 Almacenamiento de hidrógeno

Este apartado presenta un resumen de las opciones de almacenamiento de hidrógeno. Las fugas de hidrógeno, los incendios y las explosiones, así como la interacción del hidrógeno con los materiales utilizados para el almacenamiento, son extremadamente relevantes y se considerarán en las siguientes clases. El almacenamiento de hidrógeno es una tecnología que permite una serie de aplicaciones FCH, desde el almacenamiento a bordo de los vehículos de FC hasta las aplicaciones FC fijas. No existe una solución universal de almacenamiento que se pueda instalar en todos los sistemas. Cabe escoger una solución de almacenamiento de hidrógeno para cada aplicación específica. Por ejemplo, el tamaño y el peso son factores limitantes para los vehículos de pasajeros, mientras que el peso puede ser un atributo deseable para las carretillas elevadoras. Las soluciones de almacenamiento son uno de los principales retos de la economía del hidrógeno y estas tecnologías suscitan un gran interés tanto en la comunidad científica como en la industria.

² Process water inlet: entrada de agua de proceso. Inert gas inlet: entrada de gas inerte. H2 exhaust: escape de H2. Access door for electrical cabinet: puerta de acceso al cuadro eléctrico. O2 exhaust: escape de O2. Access door for process cabinet: puerta de acceso al cuadro de procesos. Cooling water inlet/outlet: entrada/salida de agua de refrigeración.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

El almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno durante largos periodos de tiempo es un paso clave en la construcción de la infraestructura de FCH, que regulará el consumo y la producción de hidrógeno y garantizará la continuidad de su suministro a los clientes. Se están investigando varios sistemas de almacenamiento subterráneo de hidrógeno. Una opción es el almacenamiento de hidrógeno gaseoso en formaciones geológicas como campos de gas agotados, acuíferos o cavidades salinas. Otra opción es el almacenamiento subterráneo en tanques enterrados bajo tierra, con el hidrógeno almacenado como gas comprimido o en forma líquida. El almacenamiento geológico suele estar situado cerca de un lugar de producción de hidrógeno, mientras que los tanques enterrados están más cerca del punto de uso, por ejemplo las estaciones de servicio.

Existen numerosas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno que podrían clasificarse en los siguientes grupos:

Almacenamiento gaseoso comprimido

Almacenamiento licuado

Almacenamiento sólido

La forma más común de almacenar el hidrógeno como gas comprimido o como líquido criogénico es en cilindros o depósitos metálicos o compuestos (Figura 2). La tecnología de criocompresión, cuando el hidrógeno gaseoso a alta presión se enfría a bajas temperaturas, es otra alternativa útil. Los cilindros pueden tener diferentes tamaños, capacidades (de 20 a 300 L) y presiones (20-70 MPa) y, para algunas aplicaciones, pueden formar un conjunto conectado o reunirse en una cesta para su transporte.



a



b



c

Figura 2 Almacenamiento de hidrógeno a bordo (a), conjunto de cilindros (b) y cesta de cilindros para el transporte (c).

El gas hidrógeno puede comprimirse hasta 20-100 MPa. Los principales problemas que plantea el almacenamiento de hidrógeno como gas comprimido son la cantidad de energía necesaria para el proceso de compresión, los problemas de seguridad inherentes al almacenamiento a presiones tan elevadas y los costes y el peso adicionales de las botellas

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

diseñadas para almacenar hidrógeno a altas presiones. Los problemas como la permeabilidad y la fragilización son proporcionales a la presión del gas, por lo que a presiones más altas el problema puede ser mayor. En Europa, la mayoría de las botellas transportables tienen una sola válvula como elemento de seguridad. En Estados Unidos, las botellas transportables incorporan dispositivos de alivio de presión. Esta prescripción es muy controvertida porque a menudo se convierten en fuentes de fugas. El almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido suele estar integrado en los sistemas de almacenamiento de hidrógeno fijos y en el almacenamiento de hidrógeno a bordo de los vehículos de FC [1].

El hidrógeno criogénico se forma cuando se enfría a una temperatura inferior a su punto de ebullición 20K (- 253 °C); es la segunda categoría principal de almacenamiento de hidrógeno. En esta forma, el hidrógeno puede almacenarse durante algún tiempo o transportarse. Esta opción de almacenamiento es también muy costosa debido a la considerable energía necesaria para la licuefacción. También conviene tener en cuenta el coste y el peso de los materiales adecuados para almacenar y mantener el hidrógeno a bajas temperaturas. Además, el hidrógeno se puede almacenar dentro de la estructura o en la superficie de ciertos materiales sólidos. Esta opción no requiere ni altas presiones ni bajas temperaturas como en los dos métodos anteriores, lo que reporta ventajas en cuanto a seguridad de los materiales. Existen tres mecanismos principales para el almacenamiento de hidrógeno en los materiales: absorción, adsorción (Figura 3a) y reacciones químicas (Figura 3, b-d). Los ejemplos de materiales y compuestos adecuados para el almacenamiento de hidrógeno sólido se muestran a continuación en la Figura 3.

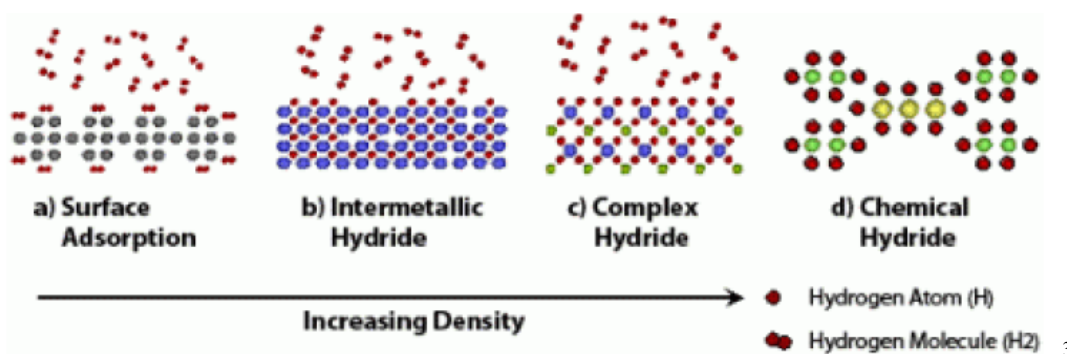


Figura 3 Materiales utilizados como almacenamiento sólido de hidrógeno [2]

Las tres opciones ofrecen ventajas y desventajas, las cuestiones de seguridad también son diferentes y se considerarán en detalle en la clase 3 sobre "Seguridad del almacenamiento de hidrógeno". Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno pueden utilizarse para diferentes

³ Surface adsorption: absorción superficial. Intermetallic hydride: hidruro intermetálico. Complex hydride: hidruro complejo. Chemical hydride: hidruro químico. Increasing density: densidad creciente. Hydrogen atom: átomo de hidrógeno. Hydrogen molecule: molécula de hidrógeno.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

finés: como contenedores para su transporte, como sistemas de almacenamiento fijo in situ (bajo o sobre el suelo), o como depósitos de almacenamiento a bordo de vehículos de FC.

3.3 Uso de hidrógeno en la industria

El hidrógeno se ha utilizado en la industria y se ha almacenado de forma segura como gas comprimido o licuado durante más de 100 años. El hidrógeno se utiliza mucho en diversas aplicaciones: refinado de petróleo crudo, como refrigerante en generadores eléctricos de grandes turbinas, como propulsor en aplicaciones de propulsión de cohetes y misiles, en la producción de amoníaco para fertilizantes, en la metalurgia para extraer metales puros de sus minerales, en las industrias de semiconductores, vidrio, farmacéutica, petroquímica, química y alimentaria, etc. Las estadísticas sobre incidentes relacionados con el hidrógeno indican que actualmente son más frecuentes los incidentes en laboratorios (alrededor del 32%) [3]. La baja tasa de accidentes se explica por las estrictas medidas de seguridad ya establecidas para la producción y el uso final del hidrógeno. Sin embargo, esta tendencia podría cambiar en los próximos años ante la expansión de las aplicaciones FCH en el ámbito público y al uso más frecuente de las tecnologías FCH por particulares sin una formación especial en materia de seguridad. Los informes de incidentes muestran que, del total de incidentes registrados hasta ahora, tan solo una pequeña proporción implica la pérdida de vidas humanas (4,6%) [4]. Aunque los problemas de seguridad del hidrógeno se han controlado eficazmente en la industria hasta la fecha, se necesitarán enfoques de seguridad adicionales, sobre todo en los procedimientos de respuesta de emergencia, tanto en el sector del transporte como en los mercados de combustibles residenciales, en especial debido a las altas presiones utilizadas para almacenar el hidrógeno. El hidrógeno no es más o menos peligroso que otros combustibles inflamables, como la gasolina y el gas natural. De hecho, algunas de sus propiedades, como la flotabilidad, ofrecen ventajas de seguridad en comparación con otros combustibles. En cualquier caso, todos los combustibles inflamables deben manejarse de forma responsable. Al igual que la gasolina y el gas natural, el hidrógeno es inflamable y puede comportarse de forma peligrosa en determinadas condiciones. El hidrógeno se puede manipular con seguridad si se respetan unas sencillas directrices y el usuario conoce bien su comportamiento único. La comprensión de las propiedades específicas del hidrógeno y el conocimiento de las aplicaciones FCH propician una aplicación segura del hidrógeno como combustible. Cabe establecer una nueva cultura de la seguridad en nuestra sociedad, para desarrollar estrategias innovadoras y soluciones de ingeniería rompedoras. Se espera que el nivel de seguridad en la interacción del consumidor con el hidrógeno sea similar o superior al presente con el uso de combustibles fósiles. Así, los parámetros de seguridad de los productos de hidrógeno y pilas de combustible definirán directamente su competitividad en el mercado [5].

4. Vehículos FC

Las tecnologías FCH para vehículos de carretera y especiales revisten una enorme importancia en la actualidad. Algunos fabricantes de automóviles, como Toyota, ya han puesto en marcha la venta de vehículos FCH en las regiones donde existe una infraestructura de repostaje. Entre los vehículos de carretera destacan: turismos, autobuses, patinetes, camionetas, etc. Utilizan el hidrógeno como combustible y no tienen motores, pues en su lugar se utiliza la FC y el motor eléctrico. La disponibilidad de la infraestructura es un paso clave para el éxito comercial de estos productos. El aspecto de estos vehículos es similar a los vehículos convencionales. A diferencia de los vehículos convencionales, no emiten contaminantes y su funcionamiento es muy silencioso. Otra aplicación importante son los vehículos especiales. Los vehículos especiales están diseñados para fines específicos y suelen funcionar en flotas. Las carretillas elevadoras FC son un buen ejemplo de los vehículos especiales. Este tipo de vehículos requiere una potencia de 1,5 a 10 kW. En la actualidad, muchas empresas privadas están invirtiendo en una flota de carretillas FC y una infraestructura de repostaje, ya que se benefician de su uso de forma casi inmediata.

4.1 Principales características de los vehículos de FC

Los vehículos de FC tienen un tren motriz eléctrico impulsado por una FC que genera electricidad en reacción electroquímica utilizando hidrógeno. Aunque hay una gran variedad de prototipos de coches de FC, las siguientes características clave (Figura 4) son comunes a la mayoría de ellos [6]:

- Sistema de repostaje de hidrógeno;
- Sistema de almacenamiento de hidrógeno;
- Sistema de suministro de combustible de hidrógeno;
- Sistema FC;
- Sistema de propulsión eléctrica y gestión de la energía.

Durante el repostaje, el hidrógeno llega al coche a través del receptáculo de repostaje (A) y fluye hacia el sistema de almacenamiento de hidrógeno (B). El hidrógeno suministrado se guarda en el sistema de almacenamiento, normalmente en forma de gas comprimido. Cuando un coche de FC se pone en marcha, se libera gas hidrógeno desde el sistema de almacenamiento. Los reguladores de presión y otros equipos del sistema de suministro de hidrógeno (C) reducen la presión al nivel adecuado para el funcionamiento de la FC. El hidrógeno se combina electroquímicamente con el oxígeno en el sistema de FC (D) para producir energía eléctrica de alta tensión. Dicha energía eléctrica se suministra al sistema de gestión de la energía de propulsión eléctrica (E), donde se utiliza para alimentar los motores eléctricos o cargar las baterías y los ultracondensadores.

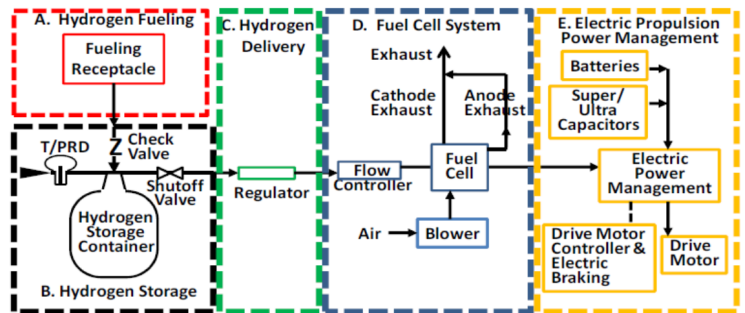


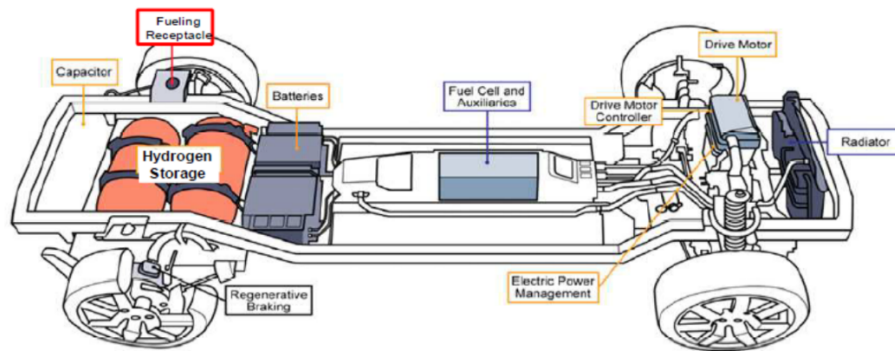
Figura 4 Sistemas clave de un coche de FC [6]

4.2 Coches FC

La Figura 5 ilustra la disposición típica de los componentes clave de un coche de FC típico [6]. El depósito de repostaje está situado en el panel trasero del coche, como en otros vehículos comunes. Al igual que los depósitos de gasolina, los de almacenamiento de hidrógeno suelen estar montados transversalmente en la parte trasera del coche, pero también se podrían montar de otra manera, por ejemplo longitudinalmente en el túnel central del coche. Las pilas de combustible y los elementos auxiliares suelen estar bajo el habitáculo, junto con la gestión de la energía, el controlador del motor de tracción y los motores de tracción. Dado el tamaño y el peso de las baterías de tracción y de los ultracondensadores, estos componentes suelen ubicarse en el coche a fin de mantener el equilibrio de peso deseado para el correcto manejo del coche.

Es posible suministrar hidrógeno al coche en una estación de servicio. En la actualidad, el hidrógeno se suministra a los coches en forma de gas comprimido, presurizado hasta el 125% de la presión nominal de trabajo (PNT) del coche para compensar el calentamiento transitorio de la compresión adiabática durante el repostaje.

⁴ Hydrogen fueling: repostaje de hidrógeno. Fueling receptacle: receptáculo de repostaje. Check valve: válvula de retención. Shutoff valve: válvula de cierre. Hydrogen storage container: contenedor de almacenamiento de hidrógeno. Hydrogen storage: almacenamiento de hidrógeno. Regulator: regulador. Fuel cell system: sistema de pila de combustible. Exhaust: escape. Cathode exhaust: escape de cátodos. Anode exhaust: escape de ánodos. Flow: flujo. Controller: controlador. Fuel cell: pila de combustible. Blower: soplador. Air: aire. Electric propulsion power management: sistema de gestión de la energía de propulsión eléctrica. Batteries: baterías. Super/ultra capacitors: supercondensadores/ultracondensadores. Electric power management: gestión de la energía eléctrica. Drive motor controller & electric braking: controlador del motor de tracción y frenado eléctrico. Drive motor: motor de tracción.



5

Figura 5 Ejemplo de un vehículo de FC [6]

4.2.1 Sistema de almacenamiento de hidrógeno

Las funciones clave del sistema de almacenamiento de hidrógeno son recibir el hidrógeno durante el repostaje, contenerlo hasta que se necesite, y después liberar el hidrógeno al sistema de FC para la alimentación del coche. Hoy en día, el método más común de almacenar y suministrar combustible de hidrógeno a bordo es en forma de gas comprimido (H_2). Se han desarrollado bombonas ligeras de gas comprimido a 700 bares para aumentar la capacidad de almacenamiento. Constan de una camisa metálica (tipo III) o polimérica (tipo IV) colocada en una estructura de material compuesto reforzado con fibra (Figura 6). Se está trabajando para reducir los costes de estos cilindros. En las siguientes clases se dará más información acerca de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno a bordo.



(a)

(b)

Figura 6 Prototipos de cilindros de 700 bares desarrollados y probados en el proyecto europeo STORHY: (a) Tecnología de tipo III, (b) Tecnología de tipo IV.

4.2.2 Sistema de suministro de hidrógeno como combustible

El sistema de suministro de hidrógeno como combustible transfiere el hidrógeno del sistema de almacenamiento al sistema de propulsión a la presión y temperatura adecuadas para que la FC funcione. Esto se consigue con una serie de válvulas de control de flujo, reguladores de

⁵ Fueling receptacle: receptáculo de repostaje. Capacitor: condensador. Hydrogen storage: almacenamiento de hidrógeno. Batteries: baterías. Regenerative braking: frenado regenerativo. Fuel cell and auxiliaries: auxiliares y pila de combustible. Drive motor controller: controlador del motor de tracción. Drive motor: motor de tracción. Electric power management: gestión de la energía eléctrica.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

presión, filtros, líneas de combustible (tuberías) e intercambiadores de calor. La mayoría de los conductos de combustible son de color plateado, aunque a veces son rojos. Si el depósito se apaga debido a un incidente, solo habrá una pequeña cantidad de hidrógeno en estos conductos. No obstante, los primeros intervinientes no deben cortar los conductos de combustible durante los procedimientos de extracción.

4.2.3 Sistema de FC

El sistema de FC genera la electricidad necesaria para el funcionamiento de los motores de propulsión y para cargar las baterías y/o los condensadores del vehículo. Hay varios tipos de FC, pero las pilas de combustible PEM son el tipo más comúnmente utilizado en aplicaciones de automoción por su menor temperatura operativa, que permite tiempos de arranque más cortos. Las pilas de combustible PEM combinan electroquímicamente hidrógeno y oxígeno para generar energía eléctrica. Las pilas de combustible generan electricidad de forma continua cuando se les suministra hidrógeno y oxígeno, y producen simultáneamente electricidad y agua sin generar dióxido de carbono (CO_2) u otras emisiones nocivas típicas de los motores de combustión interna alimentados con gasolina/gasóleo. En general, las pilas de combustible de un turismo generan una tensión de unos 400 V CC. Además, un convertidor conecta la pila de combustible con la batería de alto voltaje. La temperatura operativa de la FC es mucho menor que la del motor de combustión interna, porque es más eficiente.

4.2.4 Sistema de propulsión eléctrica y gestión de la energía

La electricidad generada por el sistema de pila de celdas de FC se utiliza para accionar los motores eléctricos que impulsan el vehículo, y para alimentar un motor de bomba de aire y un motor de aire acondicionado. Muchos turismos de FC son de tracción delantera, con el motor eléctrico y el grupo de propulsión situados en el "compartimento del motor" montado transversalmente sobre el eje delantero; con todo, otras configuraciones y la tracción trasera también son opciones viables. Los coches FC más grandes, como los vehículos utilitarios deportivos, pueden ser de tracción total con motores eléctricos en los ejes delantero y trasero o con motores compactos en cada rueda. La pila de baterías de alto voltaje suele ubicarse en una caja metálica, montada y sujeta al chasis. Los vehículos FC utilizan diferentes tipos de baterías, como las de níquel-hidruro metálico o las de iones de litio. Hay otros componentes de alto voltaje, tales como contactor de FC, unidad de control del voltaje de la batería, convertidor CC-CC, unidad de accionamiento y calentador eléctrico. La electricidad procedente de la FC y de la batería de alto voltaje se suministra a los motores mediante diversos cables, habitualmente situados dentro o detrás de los componentes de alto voltaje cerrados y debajo del vehículo. Se identifican fácilmente por las características cubiertas protectoras de color naranja.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

4.2.5 Características y conceptos de seguridad

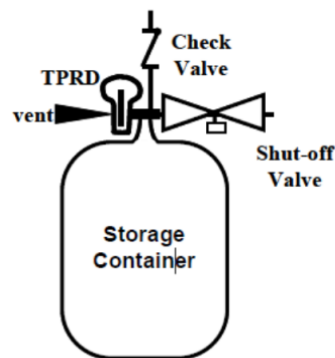
Los coches de FC se abastecen de combustible por una boquilla especial en el surtidor de una estación de servicio que se conecta con el receptáculo de abastecimiento del coche para proporcionar una transferencia de hidrógeno al coche en un "sistema cerrado". El receptáculo de repostaje del coche de FC contiene una válvula de retención u otro dispositivo que impide la fuga de hidrógeno fuera del coche cuando se desconecta la boquilla de abastecimiento.

Los componentes de un sistema típico de almacenamiento de hidrógeno comprimido se muestran en la [Figura 7](#). El sistema incluye el depósito y los demás componentes que forman la "frontera de presión primaria", que impide que el hidrógeno se escape del sistema. Existen tres dispositivos de seguridad como partes del sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido:

Una válvula de retención;

Una válvula de cierre;

Un dispositivo de alivio de presión activado térmicamente (TPRD).



6

Figura 7 Sistema típico de almacenamiento de hidrógeno comprimido [6]

Durante el repostaje, el hidrógeno entra en el sistema de almacenamiento a través de una válvula de retención. La válvula de retención impide el reflujo de hidrógeno hacia los conductos de repostaje. Una válvula de cierre automática impide la salida del hidrógeno almacenado cuando el vehículo no está funcionando o cuando se detecta un fallo que requiere el aislamiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno. En caso de incendio, los dispositivos de descarga de presión activados térmicamente (TPRD) garantizan una liberación controlada del gas de los contenedores de hidrógeno comprimido antes de que las altas temperaturas del incendio debiliten las paredes de los contenedores y provoquen su peligrosa rotura. Los TPRD están diseñados para ventilar todo el contenido del contenedor rápidamente. No se resellan ni permiten presurizar de nuevo el contenedor. Se espera que los depósitos de almacenamiento y los TPRD implicados en un incendio sean retirados del

⁶ Vent: respiradero. Check valve: válvula de retención. Storage container: depósito de almacenamiento. Shut-off valve: válvula de cierre.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

servicio y destruidos. El hidrógeno se suele ventilar (aunque no siempre) fuera del vehículo FC a través de una línea de purga. La ubicación exacta de estos conductos de ventilación depende del fabricante del vehículo y del modelo, pero suelen encontrarse en la parte posterior del vehículo, cerca del depósito de hidrógeno [6]. El sistema de suministro de combustible debe reducir la presión desde los niveles del sistema de almacenamiento hasta los valores requeridos por el sistema de celdas de combustible. En un sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido NWP de 70 MPa, por ejemplo, es posible que la presión deba bajar desde los 87,5 MPa a menos de 1 MPa en la entrada del sistema de celdas de combustible. Esto puede requerir múltiples etapas de regulación de la presión para lograr un control preciso y estable y una protección contra la sobrepresión del equipo de flujo descendente en caso de fallo del regulador de presión. La protección contra la sobrepresión del sistema de suministro de combustible se logra ventilando el exceso de gas hidrógeno a través de válvulas de alivio de presión o aislando el suministro de gas hidrógeno (cerrando la válvula de cierre en el sistema de almacenamiento) cuando se detecta una condición de sobrepresión aguas abajo [6]. En los vehículos de FC hay una serie de sensores de hidrógeno. Cuando se detecta una fuga de hidrógeno potencialmente peligrosa, el controlador del sistema detiene el flujo de hidrógeno del depósito de modo automático. Los sensores se sitúan en varias zonas: el panel de instrumentos, junto a los depósitos de hidrógeno, cerca de un tubo de escape, bajo del capó, encima del revestimiento del techo en el habitáculo, etc. Cuando el sistema de propulsión está "encendido", estos sensores controlan la concentración de hidrógeno continuamente en esas zonas. Por ejemplo, según el POE (procedimiento operativo estándar) de Primeros Intervinientes en Estados Unidos, cuando se detecta hidrógeno en un "nivel de advertencia", el conductor será alertado por el icono "H₂" situado en el panel de instrumentos, y el Centro de Información al Conductor (CIC) mostrará un mensaje "H₂ detectado". Si se detecta hidrógeno en un "nivel de alarma", el icono "H₂" parpadeará, sonará un pitido y aparecerá el mensaje "H₂ detectado - Evacuar el vehículo" en el CIC [7]. Cabe destacar que se aplicaron normas de niveles de peligro distintas según el país, aunque los procedimientos operativos estándar generales fueran similares. Las concentraciones de hidrógeno diferentes activan diversos niveles de advertencia en cada país.

4.3 Autobuses de FC

Los autobuses de FC utilizan la misma tecnología que los coches de FC. El hidrógeno se almacena en depósitos situados normalmente en el techo del autobús. La capacidad total se aproxima a los 40 kilogramos. La pila de celdas de combustible está en el compartimento trasero del motor. La pila de celdas de combustible de los autobuses es más grande que la de los coches FC y genera una tensión más alta, de unos 600 V. Las principales ventajas de los autobuses de FC comparados con los convencionales son la contaminación reducida, la menor concentración de gases de efecto invernadero, la mayor eficiencia energética y un

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

funcionamiento más silencioso. Hay una serie de proyectos europeos asociados al transporte basado en hidrógeno. Por ejemplo, Clean Energy Partnership (CEP) [8] es el proyecto que pretende probar y demostrar el uso de las tecnologías FCH en aplicaciones de transporte. CEP es una cooperación internacional creada en 2002 por 18 socios, entre los que destacan los principales fabricantes de automóviles, como Grupo BMW, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota y Volkswagen. En 2011 la CEP pasó a su tercera fase "Preparación del mercado". Otro proyecto es HyFLEET: CUTE, que pretende desarrollar y operar la mayor flota de autobuses de FC del mundo. HyFLEET: El proyecto CUTE ha supuesto la explotación de 47 autobuses propulsados por hidrógeno en servicio regular de transporte público en 10 ciudades de tres continentes (Ámsterdam, Barcelona, Pekín, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid, Perth, Reikiavik) [9]. Estos autobuses han conseguido proporcionar datos valiosos a los desarrolladores y operadores, pues se utilizan en condiciones duras, en condiciones climáticas extremas y de funcionamiento ininterrumpido. Otro aspecto importante de este proyecto ha sido familiarizar al público con esta nueva tecnología y conseguir así la aceptación de su lanzamiento [9]. Londres cuenta ahora con una flota de 8 autobuses FC que recorren la ruta RV1 entre Covent Garden y Tower Gateway (Figura 14). Un proyecto FCH JU (Empresa Común Pilas de Combustible e Hidrógeno) de seis años de duración, JIVE (Iniciativa Conjunta para Vehículos de Hidrógeno en Europa), iniciado a partir de enero de 2017, pretende desplegar 139 nuevos autobuses de pila de combustible de cero emisiones y la infraestructura de repostaje asociada en cinco países. Un proyecto posterior, JIVE2, iniciado en enero de 2018, combinado con el proyecto JIVE, desplegará casi 300 autobuses de pila de combustible en 22 ciudades de Europa para principios de la década de 2020, el mayor despliegue hasta la fecha. (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>)



Figura 8 Autobús de hidrógeno Wright Pulsar 2 en la ruta RV1 de Londres.

"Los autobuses de pila de combustible han evolucionado de forma considerable en las últimas décadas. Se han utilizado diferentes configuraciones de diseño, incluyendo el hidrógeno en el

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

ICE, y varias tecnologías de pila de combustible. Además, las empresas han utilizado sistemas de tracción directa y sistemas híbridos, en los que se incluye un dispositivo de almacenamiento de energía (batería o ultracondensador) dentro de la cadena cinemática para reducir los picos de carga y permitir el frenado regenerativo" [10]. En la revisión realizada dentro del proyecto NextHyLights se presenta una breve comparación de las principales tecnologías de autobuses de hidrógeno [10]. La Figura 9 muestra un esquema del autobús de FC "All American" de SunLine [11]. En este ejemplo, el hidrógeno se almacena como gas comprimido (HGC2). Adams [12] realizó una investigación sobre la presión óptima de almacenamiento a bordo que sería necesaria para los autobuses equipados con depósitos de HGC2. Se llegó a la conclusión de que es necesario un dispositivo normalizado de restricción de la presión de almacenamiento a bordo para evitar que un vehículo se reposte a una presión superior a la presión de almacenamiento para la que fue diseñado. Esta normalización también serviría para reducir los costes innecesarios de desarrollo del sistema para los vehículos y la infraestructura de repostaje asociada, así como para rebajar el riesgo de daños en interfaces de repostaje por motivos de incompatibilidad. La energía de compresión dentro del gas en un depósito aumenta para una determinada masa de hidrógeno con el aumento de la presión de almacenamiento; por lo tanto, la expansión repentina del gas debido a la ruptura del depósito podría tener graves consecuencias, que aumentarían con presiones más altas. Por ello, al considerar los sistemas de almacenamiento para autobuses, en los que el volumen no es una restricción tan decisiva como en los coches, se averiguó que las presiones óptimas los autobuses urbanos no articulados de un solo piso oscilan entre 20 y 35 MPa [12].

Los dispositivos de seguridad utilizados en los autobuses de FC se asemejan a los de los coches de FC. El dispositivo de descarga de presión (PRD) es un dispositivo de activación térmica que no se cierra y que está diseñado para proteger un depósito de hidrógeno presurizado de un fallo catastrófico si se produce una emergencia como un incendio. Se utiliza para garantizar que el impacto térmico causado por las llamas no aumente la presión en el recipiente de almacenamiento más allá de su capacidad estructural. Con todo, cabe señalar que los incendios que provocan la apertura de un PRD no siempre resultan en la ignición inmediata del hidrógeno al liberarse. Los depósitos de hidrógeno incorporan dispositivos de descarga de presión activados térmicamente (PRD) y conductos de combustible y de ventilación de acero inoxidable. Hay un botón de dispositivo de parada de emergencia (DPE) en el panel del conductor, y otro en la propia pila de combustible del compartimento motor.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

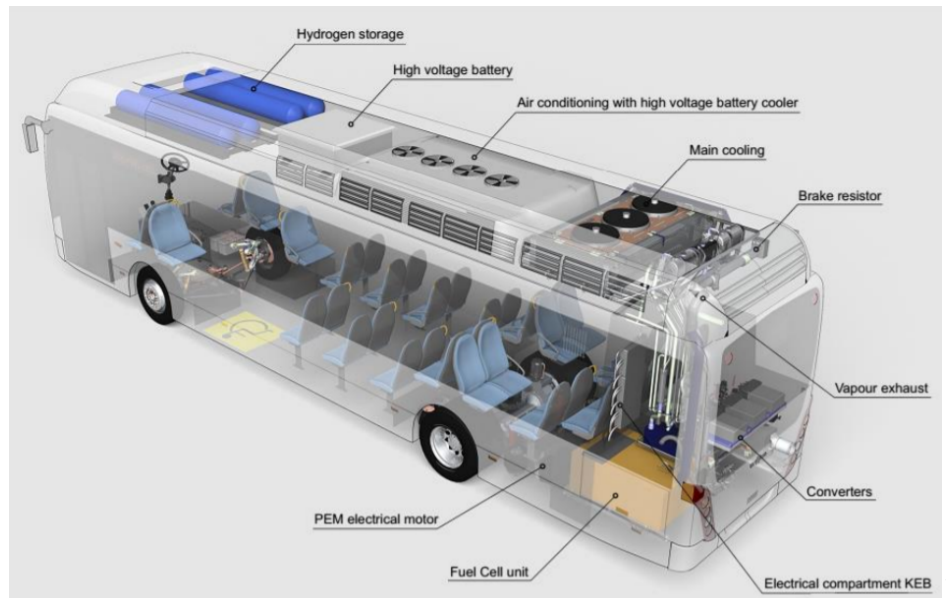


Figura 9 Disposición de los principales componentes de un autobús de FC [11]

Los equipos de primera respuesta deben aprender a tratar con los vehículos de FC en accidentes de tráfico. Los principales riesgos están asociados al alto voltaje (hasta 600 V) y las elevadas presiones de gas (hasta 70 MPa). Para los diferentes tipos de vehículos de carretera, la normativa EC79/2009, junto con la EC406/2010, exige el etiquetado de los vehículos de FC: en el caso de los vehículos ligeros, la etiqueta debe colocarse de forma visible cerca del depósito de repostaje (debe haber otra etiqueta dentro del compartimento motor). Se está trabajando en actualizar las pautas en este ámbito y se aconseja a los intervinientes que confirmen los requisitos de etiquetado, por ejemplo, el grupo de trabajo 13 de la CEPE/ONU (<https://unece.org/wp29-introduction>).

Todos los vehículos de FC han de contar con Hojas de datos de rescate, que deben encontrarse a bordo del vehículo. Lo ideal es que los cuerpos de bomberos tengan acceso a esta información desde los enlaces de comunicación. Sin embargo, se observa que los niveles de acceso varían significativamente y no siempre es posible. Los parámetros de identificación del vehículo también deberían incluir todas las características de alta tensión y alta presión para informar a los primeros intervinientes con suficiente antelación. Al igual que los vehículos de combustible convencional, los siguientes componentes pueden suponer un peligro para los primeros intervinientes en caso de accidente de tráfico: parachoques, amortiguadores, neumáticos, puntales de capó y maletero, airbags, pretensores de los cinturones de seguridad, sistema de aire acondicionado y baterías. Conviene destacar que la

⁷ Hydrogen storage: almacenamiento de hidrógeno. High-voltage battery: batería de alto voltaje. Air conditioning with high voltage battery cooler: aire acondicionado con refrigerador de batería de alto voltaje. Main cooling: refrigerador principal. Brake resistor: resistencia del freno. Vapour exhaust: salida de vapor. Converters: transformadores. Electrical compartment: compartimento eléctrico. Fuel cell unit: unidad de pila de combustible. Electrical motor: motor eléctrico.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

desconexión de un cable de baja tensión aislará y desconectará todos los sistemas del vehículo (por ejemplo, sistemas de almacenamiento de hidrógeno, de alto y bajo voltaje) en un vehículo de FC.

4.4 Carretillas de FC

Muchas empresas con grandes almacenes o centros de distribución utilizan actualmente carretillas elevadoras de FC para mover mercancías, que funcionan las 24 horas del día [1]. Las carretillas elevadoras de FC son vehículos híbridos que combinan una pila de combustible, normalmente de 1,5 a 10 kW, con una batería. Las bombonas de hidrógeno se almacenan fuera de la instalación/almacén. El hidrógeno es suministrado por un proveedor de gas industrial o se produce in situ con métodos de reformado de gas natural o electrólisis del agua. El repostaje de una carretilla elevadora de FC con hidrógeno se realiza principalmente en interiores (también es posible instalar surtidores al aire libre) y sólo tarda unos minutos. En comparación con los vehículos especiales alimentados por baterías, las carretillas de FC tienen una vida útil más larga, tienen más potencia durante más tiempo y pueden repostar en menos de 3 minutos. Otro punto a favor de las carretillas de FC son los menores costes operativos y la mayor productividad debida al menor número de viajes a una estación de carga de baterías. Como no se necesitan cargadores de baterías ni zonas de almacenamiento o intercambio de baterías, se dispone de más espacio en el almacén para otros usos. Los principales proveedores industriales venden estaciones de repostaje de hidrógeno en almacenes para carretillas de FC. En la [Figura 10](#) se muestra un ejemplo de carretilla elevadora de FC y unidad de pila de combustible.



Una carretilla elevadora de FC

Pila de combustible de una carretilla elevadora de FC

Figura 10 Carretilla elevadora de FC y su unidad de FC [1]

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

Los principales componentes de una unidad FC se señalan en la [Figura 11](#). Incluyen:

- pila de combustible (denominada PAC);
- auxiliares de la pila de combustible;
- recipiente de almacenamiento de hidrógeno, cuyo volumen oscila entre 20 y 70 L en agua y dotado de un sistema regulador;
- batería de iones de litio, que ha superado las pruebas exigidas por Naciones Unidas (ONU), especificadas en el Manual de Pruebas y Criterios de las Naciones Unidas, apartado 38.3;
- depósito de recogida de agua.

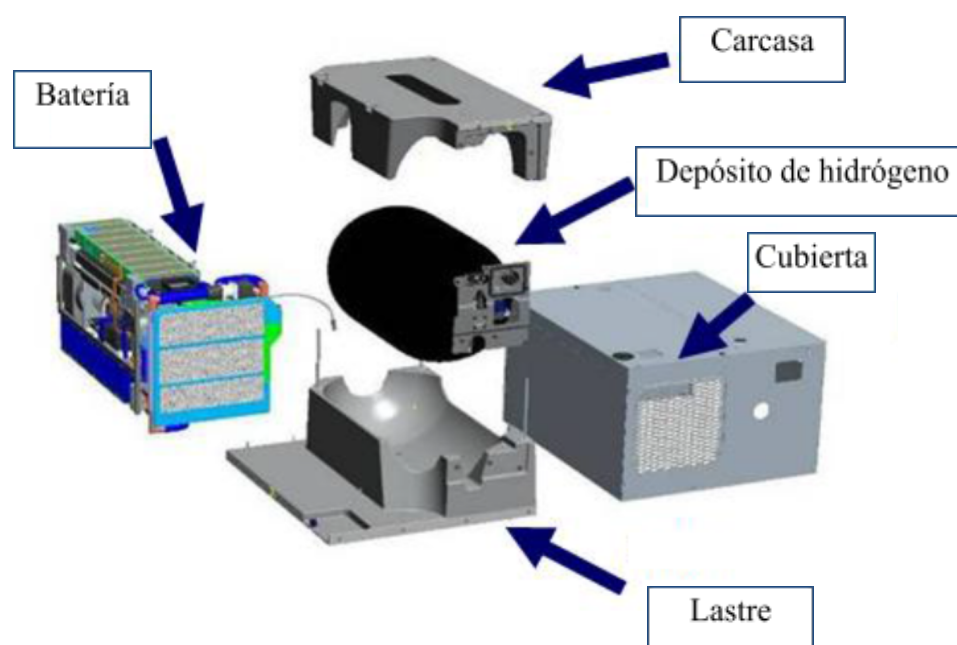


Figura 11 Componentes de la unidad de pila de combustible de la carretilla

En cuanto a la seguridad, el almacenamiento de hidrógeno está protegido con un TPRD (activado por un fusible térmico) situado entre la válvula de aislamiento de la carretilla y la botella. El fusible se abre a 109°C y permite la liberación rápida del hidrógeno presurizado. También hay una válvula antirretorno en el orificio de llenado para impedir que se escape gas del depósito. Además, todos los componentes de la FC están integrados en una carcasa de hierro fundido que, a su vez, está protegida por una cubierta. Esta carcasa de hierro fundido ofrece dos ventajas: protege contra los daños mecánicos externos y permite ventilar el flujo de hidrógeno en caso de ataque térmico externo.

4.5 Aviación

El estudio del uso del hidrógeno como combustible en los aviones comenzó en 1956. Estados Unidos consiguió hacer volar un avión B57 Canberra con combustible de hidrógeno presurizado con helio en uno de sus motores [13]. Después del B57, los soviéticos probaron

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

la conversión experimental de un Tu-154 de primera fabricación que tenía un motor accionado con hidrógeno en 1988. El motor alimentado con hidrógeno líquido se probó a alturas de hasta 7.000 m y se aceleró a 900 km/h. Por desgracia, el programa de hidrógeno líquido (HL) se limitó a tan solo cinco vuelos y se decidió no continuar con este tipo de combustibles por los altos costes y la falta de infraestructura de hidrógeno [14]. Hasta hoy se han construido muchos prototipos de aviones de hidrógeno, como el Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), el Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), el Boeing Phantom Eye (Jackson y Haddox, 2010) y el ENFICA-FC Rapid 200-FC (Comisión Europea, 2011) utilizando métodos de almacenamiento por compresión y licuefacción [15]. En la [Figura 11](#) se ilustra la escala de tiempo de desarrollo histórico de las aeronaves impulsadas por hidrógeno líquido y pilas de combustible. En septiembre de 2016, el primer avión de pasajeros de cuatro plazas impulsado por pilas de combustible de hidrógeno, el HY4, completó su primer vuelo desde el aeropuerto de Stuttgart. En este futuro taxi eléctrico, el combustible hidrógeno se almacena a una presión de 4.300 PSI a 5.800 PSI en dos depósitos de fibra de carbono ubicados en los dos fuselajes. En este avión con una velocidad máxima de 200 km/h, la pila de combustible convierte directamente el hidrógeno en electricidad y el único producto de desecho de este proceso es agua [16]. El 21 de septiembre de 2020, Airbus reveló tres conceptos para el primer avión comercial del mundo con cero emisiones que podría entrar en servicio en 2035. Cada uno de estos conceptos representa un enfoque diferente para lograr un vuelo con cero emisiones, explorando diversas vías tecnológicas y configuraciones aerodinámicas a fin de impulsar la ambición de la empresa de liderar la descarbonización de la industria de la aviación. Estos conceptos se basan en el hidrógeno como fuente de energía primaria, una opción que Airbus considera enormemente prometedora como combustible limpio para la aviación y que podría ser una solución para que la industria aeroespacial y muchos otros sectores cumplan sus objetivos de neutralidad climática.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

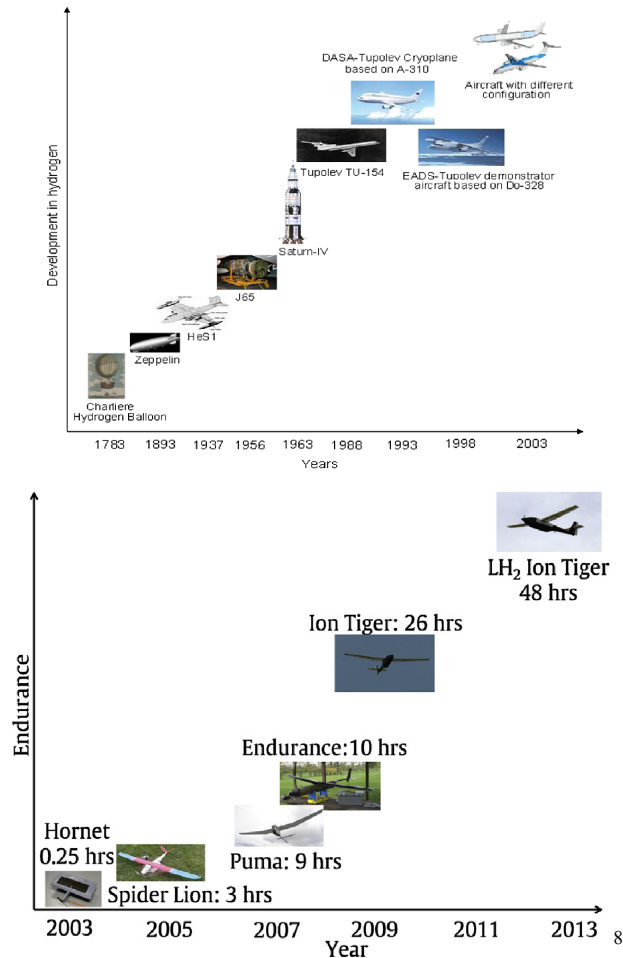


Figura 12 Calendario histórico de desarrollo de aviones propulsados por hidrógeno (izquierda) y pilas de combustible (derecha)

Un avión tiene un peso máximo de despegue de hasta 640 toneladas. Para transportar estas cargas, se necesitan motores grandes y potentes, y estos motores consumen mucho combustible. Esta necesidad de combustible presenta beneficios y desafíos relacionados con la seguridad del combustible, su coste, la energía específica y la eficiencia energética equivalente. En la actualidad, las aeronaves utilizan mayoritariamente combustibles derivados del petróleo derivados de los combustibles fósiles. Entre estos combustibles, el coste del queroseno, muy utilizado, es menor que el de otros combustibles [15, 17]. Aunque el queroseno y algunas mezclas de gasolina eran preferibles como combustible para la aviación, sus reservas son limitadas y el aumento de las emisiones de efecto invernadero perjudica al medio ambiente. Con estas consideraciones, los investigadores y los fabricantes

⁸ Development in hydrogen: desarrollo del hidrógeno. Years: años. Charliere hydrogen balloon: globo de hidrógeno Charliere. Zeppelin: zepelín. Saturn-IV: Saturno-IV. EADS-Tupolev demonstrator aircraft based on Do-328: avión de demostración EADS-Tupolev basado en el Do-328. DASA-Tupolev Cryoplane based on A-310: DASA-Tupolev Cryoplane basado en el A-310. Aircraft with different configuration: Aviones con otras configuraciones. Endurance: resistencia.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

están considerando nuevas formas de manejo de la energía con combustibles alternativos/renovables.

Así las cosas, los combustibles fósiles convencionales utilizados en la aviación se están reemplazando por combustibles alternativos. Uno de los elementos más importantes de la familia de combustibles es el hidrógeno. El hidrógeno se ha convertido en los últimos años en el centro de atención de los investigadores y expertos en combustión debido a su disponibilidad, sus mejores propiedades energéticas específicas y sus beneficios medioambientales.

El hidrógeno se suele utilizar para dos fines en los aviones, bien como combustible en lugar de queroseno en las aeronaves grandes, bien como combustible en las pilas de combustible PEM de los motores a reacción en pequeños aviones de hélice [15].

5. Transporte de hidrógeno

Como es sabido, el hidrógeno se ha utilizado en la industria durante muchas décadas. Después de producirse el hidrógeno en un centro de producción centralizado, se suele transportar a los usuarios finales o las respectivas aplicaciones de FC. El hidrógeno se puede transportar como gas comprimido o como líquido criogénico. Por ello, existen varias opciones para su transporte a granel: por carretera en camiones/remolques y contenedores o por tuberías.

5.1 Vehículos pesados

5.1.1 Camiones de gas

Las empresas de gas industrial utilizan actualmente flotas de camiones para transportar botellas de acero sin soldadura de hidrógeno gaseoso comprimido (HGC2) en distancias de 200-300 km desde un centro de producción centralizado. Se instalan botellas monocilíndricas, paquetes multicilíndricos o tubos cilíndricos largos en los remolques (Figura 13). La presión de almacenamiento oscila entre 200 y 300 bares y un remolque puede transportar de 2.000 a 6.200 Nm³ de HGC2 para camiones, con un peso máximo de 40 toneladas. La cantidad de hidrógeno transportada de este modo es relativamente baja (de 180 a 540 kg según el número de tubos o conjuntos), lo que representa alrededor del 1-2% de la masa total del camión. Los remolques actuales utilizan cilindros de almacenamiento de tipo I (es decir, totalmente metálicos). Para aumentar su rendimiento, se pueden utilizar grupos de cilindros o tubos ligeros envueltos en aros (Tipo II). Este modo de suministro es bastante sencillo, aunque ha de adaptarse a las cantidades y distancias de hidrógeno para ser rentable. Las principales restricciones en el suministro de gas comprimido por camión son los costes de capital, de funcionamiento y de mantenimiento, incluida la mano de obra de los conductores, y los costes de combustible.



(a)



(b)

Fuente: AirLiquide, 2014.

Figura 13. Dos tipos de remolques HGC2 gestionados por AirLiquide en Europa: (a) remolque tubular con capacidad de 2.000 a 3.000 Nm³ de hidrógeno y (b) remolque de cilindros compuestos con capacidad de 6.200 Nm³ de hidrógeno.

El transporte por camión gaseoso (remolque tubular, cilindros) es uno de los modos más desarrollados para el transporte en distancias cortas y para pequeñas cantidades de hidrógeno. Las principales limitaciones son la escasa capacidad de almacenamiento por peso para clientes con consumos elevados (que precisan entregas frecuentes) y la baja presión del hidrógeno suministrado, que requiere una compresión adicional, por ejemplo en una estación de servicio. Por ello, se investigan tecnologías alternativas con más presión, mayor capacidad de transporte de hidrógeno y sistemas de menor coste, como se describe a continuación. Lincoln Composites desarrolla tubos de material compuesto de mayor capacidad. El material de un depósito es un revestimiento de plástico totalmente envuelto con fibra de carbono impregnada de epoxi para suministro en remolques de tubos de hidrógeno gaseoso. Por ejemplo, el depósito TITANTM (1,08 metros de diámetro, 11,5 metros de longitud, 8.400 litros de volumen de agua y 2.087 kg de peso) funciona a una presión de 250 bares. Puede suministrar 2-3 veces más hidrógeno en comparación con la cantidad de hidrógeno almacenado/transportado en tanques de acero de masas similares. La [Figura 14](#) muestra la unidad de almacenamiento con cuatro depósitos de material compuesto capaces de almacenar 600 kg de hidrógeno a 250 bares. En la actualidad se están desarrollando tanques aptos para presiones más altas.



Fuente: Lincoln Composites, 2014.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

Figura 14 Remolque que transporta cuatro depósitos de material compuesto desarrollado por Lincoln Composites.

En el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) se exploran tecnologías híbridas como la criocompresión, que combina presión y baja temperatura para aumentar la cantidad de hidrógeno almacenable por unidad de volumen y evitar las penalizaciones energéticas asociadas a la licuefacción del hidrógeno. El gas de hidrógeno comprimido a temperaturas criogénicas es mucho más denso que en los depósitos comprimidos normales a temperatura ambiente. Estos nuevos recipientes podrían almacenar hidrógeno a temperaturas tan bajas como 80 K a presiones de 200-400 bares. Este enfoque requiere el desarrollo de depósitos compuestos a presión aislados. Como alternativa se podría considerar el uso de depósitos de hidrógeno gaseoso frío, que requerirían menos refrigeración. Es posible que haya una combinación óptima de presión y temperatura en el rango de 80-200 K. Recientemente, el LLNL encontró materiales de fibra de vidrio baratos para el almacenamiento de gas hidrógeno en frío (~ 150 K y hasta 500 bares), con una reducción prevista del 50% del coste del remolque.

Los principales dispositivos de seguridad utilizados en los camiones de gas son válvulas de seguridad manuales. Durante el transporte, todos los recipientes de almacenamiento de hidrógeno están aislados por una válvula. En servicio, existen diferentes dispositivos y procedimientos de seguridad:

- El procedimiento de cambio de semirremolque se realiza así:

El conductor aparca el semirremolque en el lugar previsto,

El conductor coloca los calces y despliega el caballete,

El conductor desengancha la cabeza tractora,

El conductor conecta la manguera del semirremolque lleno, comprueba la estanqueidad de la manguera de extracción y desconecta el semirremolque vacío,

El conductor engancha el semirremolque vacío a la cabeza tractora y se marcha.

- Una prueba manual de estanqueidad en la conexión a un semirremolque. Se lleva a cabo en las siguientes etapas. El operario conecta la manguera del semirremolque al poste de conexión de la instalación. La manguera se presuriza. El operario comprueba la estanqueidad con el jabón de detección y la estabilización de la presión medida localmente con un manómetro.

5.1.2 Camiones de líquido criogénico

El hidrógeno también se puede transportar por carretera en forma líquida (refrigerado por debajo de 20 K o -253 °C) para distribuir cantidades mayores (cientos de m³/h). En cuanto a capacidad de peso, los camiones de hidrógeno líquido superaislado (HL₂) transportan hasta

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

10 veces más hidrógeno que los remolques tubulares utilizados para el HGC_2 . Los camiones de HL_2 que funcionan a presión atmosférica tienen una capacidad volumétrica de unos 50.000-60.000 litros y transportan hasta 4.000 kg (Figura 15). Es el modo de distribución preferido para cantidades medianas/grandes de hidrógeno en largas distancias, lo que explica que el negocio del HL_2 se haya desarrollado más en Norteamérica (la capacidad de licuefacción de hidrógeno en Norteamérica es unas diez veces mayor que en Europa). El hidrógeno líquido transportado en el camión se vaporiza hasta convertirse en un producto de alta presión que se utiliza en las instalaciones del cliente.



Fuente: Banco de Imágenes de AirLiquide, 2015

Figura 15 Camión cisterna operado por Air Liquide para transportar HL_2 al usuario final.

El principal problema de esta ruta de transporte es un proceso de licuefacción que requiere mucho capital. El proceso de licuefacción también es costoso. El aporte de energía para la licuefacción representa el 30-40% del valor calorífico inferior del hidrógeno (frente al 10% necesario para comprimir el gas) [21]. El coste de la electricidad representa entre el 50 y el 80% de los costes de licuefacción. La distancia es el principal factor decisivo entre el transporte de HL_2 y de hidrógeno gaseoso HGC_2 . El número de camiones de HL_2 dependerá de la demanda de hidrógeno y de la ubicación del punto de licuefacción. Con todo, como la capacidad de los camiones de líquido es mucho mayor que la de los camiones de gas comprimido, este modo de suministro depende menos de la distancia de transporte. El coste de capital del camión y el coste operativo (combustible, mano de obra) son mucho menores. Así, el transporte por camión de líquidos es más económico que el de gases para distancias largas (desde unos 400 km hasta miles de kilómetros) y cantidades medias de hidrógeno. Sin embargo, hay que tener en cuenta la disponibilidad de HL_2 . Actualmente, el mercado de hidrógeno industrial está atendido por cuatro licuadoras en Europa y diez en Norteamérica. Unos mercados más grandes justificarían la construcción de nuevas plantas de licuefacción. Es posible que se logren notables reducciones de costes gracias a los efectos de escala de los equipos de licuefacción. No obstante, este modo de suministro depende del precio de la electricidad y de la decisión de instalar nuevas unidades de licuefacción. Una mejora en las

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

tecnologías ofrecería oportunidades para reducir el coste de capital, mejorar la eficiencia energética del proceso de licuefacción y reducir la cantidad de hidrógeno que se pierde debido a la ebullición durante el almacenamiento y el transporte (la tasa de evaporación, que depende del tamaño, la forma, el aislamiento del contenedor y el tiempo de almacenamiento, suele situarse en el 0,2%/día para un contenedor de 100 m³). Se están realizando estudios para mejorar las tecnologías de licuefacción y proponer enfoques novedosos (por ejemplo, mejora de la conversión orto-para, desarrollo de la refrigeración magnética, etc.).

5.2 Trenes

El primer tren de hidrógeno del Reino Unido, desarrollado por el proyecto HydroFLEX, hizo su primer viaje por las vías férreas principales de Warwickshire en septiembre de 2020. En los próximos años se pondrán en circulación más trenes de pila de combustible por toda Alemania. Pero la cuestión sigue siendo cuál es la mejor manera de suministrar el hidrógeno a las estaciones de servicio de los trenes. Una posible vía es el ferrocarril, y la Agencia Estatal de la Energía de Hesse lo avala; esta encargó a DB Energie, el proveedor de energía del operador ferroviario nacional alemán Deutsche Bahn, que investigara cómo lograrlo en términos de viabilidad técnica, operativa y legal. Se examinó esta cuestión a partir de una fuente de hidrógeno existente en el polígono industrial de Höchst, en Fráncfort del Meno, en dos rutas concretas de la zona del Rin-Meno (véase la [Figura 16](#)).



Fuente: NPROXX, 2020

Figura 16 Transporte de hidrógeno por ferrocarril.

Los expertos de DB Energie concluyeron que era factible suministrar hidrógeno a la infraestructura de repostaje por ferrocarril. Son numerosas las ventajas respecto a la carretera, como la planificación precisa de los tiempos de desplazamiento, el alto nivel de fiabilidad y seguridad, la posibilidad de transportar grandes cantidades y el alivio del tráfico por carretera en las áreas metropolitanas. Desde el punto de vista técnico y jurídico no hay nada en contra

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

del transporte por ferrocarril. Sin embargo, todavía no hay contenedores de hidrógeno homologados para el tráfico ferroviario, tan solo para el tráfico por carretera. Como los requisitos son muy similares, cabe esperar que pronto se obtendrá la certificación para su uso sobre raíles. Para conocer la viabilidad y la eficiencia económica, habría que realizar un estudio aparte para determinar si el transporte ferroviario es más económico que la carretera. En las dos rutas examinadas, el tráfico ferroviario salió algo peor parado. Con todo, no se pueden hacer afirmaciones generales al respecto. El transporte de hidrógeno por carretera no es una solución realmente sostenible, sobre todo si los trenes de pila de combustible se siguen repostando en el futuro.

5.3 Tuberías

Hoy en día se utilizan varias tuberías de hidrógeno comerciales para distribuir grandes cantidades (decenas de miles de m^3/h) de hidrógeno gaseoso al mercado industrial. Sus longitudes oscilan entre menos de un kilómetro y varios centenares. Los principales ofertantes son empresas de gas industrial, en concreto Air Liquide, Air Products, Linde y Praxair. Se están ampliando las redes existentes y construyendo nuevos tramos, en respuesta al aumento de la demanda de hidrógeno sobre todo por parte de las refinerías. Por ejemplo, en marzo de 2009 Air Products anunció la ampliación de 60 km de la red de conductos de hidrógeno de la Costa del Golfo de Estados Unidos, en Luisiana. Se calcula que la red de hidrógeno ocupa unos 1.600 km en Europa y 1.100 km en Norteamérica. La mayor parte de las tuberías se encuentran en lugares donde se consumen grandes cantidades de hidrógeno en los sectores químico y de refinado. Se trata de sistemas situados en el norte de Europa (que abarcan los Países Bajos, el norte de Francia y Bélgica), Alemania (zonas del Ruhr y Leipzig), Reino Unido (Teesside) y Norteamérica (Golfo de México, Texas-Luisiana, California y Alberta). También hay sistemas más pequeños en Sudáfrica, Brasil, Tailandia, Corea, Singapur e Indonesia. En general, las longitudes de estas tuberías son pequeñas en comparación con el sistema mundial de gasoductos, que supera los 2.000.000 km.

La [Figura 17](#) ilustra partes de la red mundial de conductos de hidrógeno. Por ejemplo, la tubería de 240 km de longitud en la zona del Ruhr en Alemania ([Figura 17 a](#)), adquirida por Air Liquide en 1998, lleva funcionando desde 1938. Dentro del proyecto europeo "Región Cero" para las aplicaciones de energía del hidrógeno, Linde ha instalado una tubería de hidrógeno de 900 bares (1" de diámetro) en una distancia de 1,7 km en el parque industrial de Frankfurt-Hoechst para abastecer a los vehículos de pasajeros con pila de combustible.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta



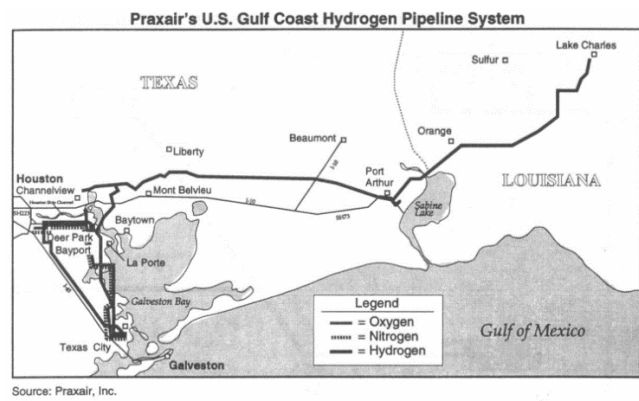
a



b



c



d

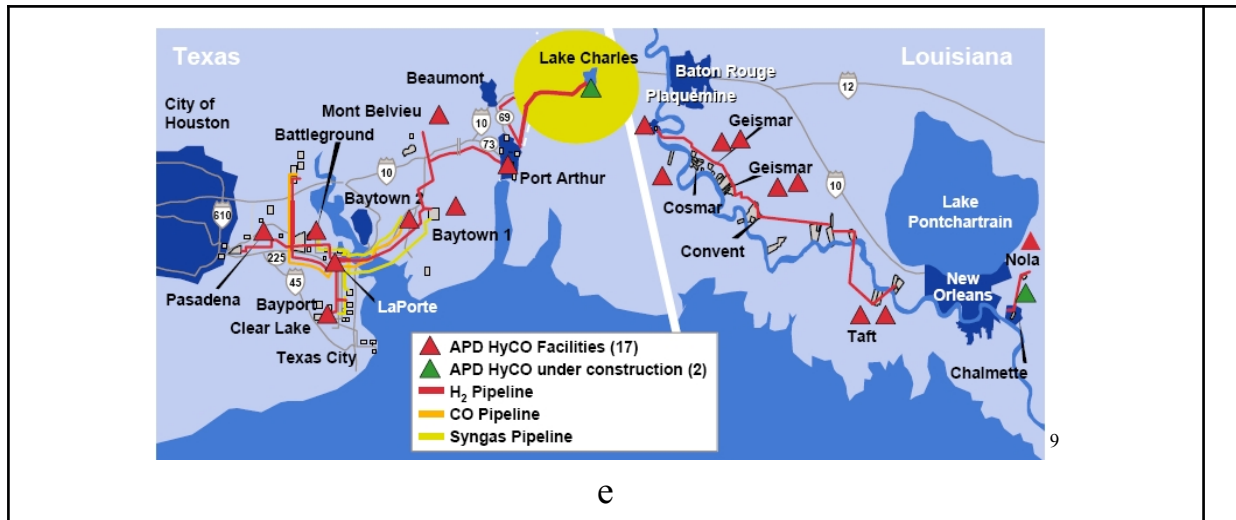


Figura 17 Principales tuberías de hidrógeno en el mundo: (a) tuberías de hidrógeno de Air Liquide en Benelux, Francia y Alemania (zona del Ruhr); (b) tuberías de hidrógeno de Air Liquide en la costa del Golfo (EE.UU.); (c) tuberías de hidrógeno de Linde en Alemania; (d) tuberías de hidrógeno de Praxair en la costa del Golfo (EE.UU.); (e) tuberías de hidrógeno de Air Product en la costa del Golfo (EE.UU.).

6. Aplicaciones fijas

6.1 Sistemas de cogeneración de calor y electricidad (CHP)

En las plantas tradicionales de cogeneración, la electricidad y el calor se producen mediante la combustión de gas natural en el motor de combustión interna o en la turbina. Los sistemas de cogeneración basados en FC generan electricidad y agua caliente en la reacción electroquímica descrita anteriormente. Se consideran dos tecnologías de FC: Pila de combustible de óxido sólido (SOFC) y FC PEM. El gas natural se convierte para producir hidrógeno y una mezcla de hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono (syngas, en inglés) con impurezas se introduce directamente en la FC para generar energía. En los sistemas FC PEM, que utilizan temperaturas más bajas, el syngas necesita una mayor purificación para eliminar el monóxido de carbono y los compuestos con azufre. Las instalaciones de microgeneración se han introducido en Europa en el marco del proyecto Callux (<http://enfield.eu/>).

6.2 Generación de energía de reserva

El objetivo principal de este tipo de tecnología es proporcionar energía instantánea en caso de apagón. La capacidad de potencia de esta instalación oscila entre 16 y 80 kW con hasta nueve cilindros de hidrógeno. Las principales ventajas de esta aplicación son:

Alta fiabilidad y puesta en marcha rápida.

⁹ Facilities: instalaciones. Under construction: en construcción. Pipeline: tubería.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

Autonomía escalable, solo en función del volumen de almacenamiento de gas.

Bajo mantenimiento.

Funcionamiento limpio y silencioso [1].

Los posibles usuarios de este tipo de aplicación son: telecomunicaciones, centros de datos, hospitales, militares, industrias, hoteles de lujo, etc. En la [Figura 18](#) se muestra un ejemplo de sistema de energía de reserva de FC utilizado en el proyecto IP Energy (Aix-en-Provence, Francia). El sistema de energía de reserva de 30 kW instalado en 2008 es la primera solución containerizada. El almacenamiento interno de gas permitió una capacidad de funcionamiento de 4 horas.



Figura 18 Potencia de reserva de FC acoplada al centro de datos de IP Energy.

Las características y conceptos de seguridad para el sistema son los siguientes:

- El sistema de FC tiene dos líneas de ventilación separadas, una para el oxígeno y otra para el hidrógeno, que descargan el gas en el techo del contenedor a una distancia de riesgo para evitar la mezcla de oxígeno e hidrógeno durante la descarga. Tras una descarga perdura una cantidad residual de hidrógeno en el sistema.
- El compartimento de proceso incorpora dos sensores de hidrógeno que pueden activar una parada de emergencia si la concentración de hidrógeno en los contenedores supera el 0,4 % vol. Si se detecta una concentración anormal de hidrógeno, se activa una parada de seguridad y se llevan a cabo las siguientes acciones:
 - Detener todos los procesos del sistema.
 - Activar las ventilaciones mecánicas.
 - Aislar los depósitos de gas cerrando las electroválvulas.
- La detección de hidrógeno se supervisa continuamente incluso cuando el sistema está en modo de espera. En caso de pérdida de detección, el sistema activa una parada de seguridad.
- Los contenedores están equipados con detectores de incendios. Si estos se activan, deben llevarse a cabo estas acciones:
 - Detener todos los procesos del sistema.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

- Aislar los depósitos de gas cerrando las electroválvulas.
- Cancelar las ventilaciones.
- Las atmósferas explosivas peligrosas resultantes de posibles fugas o escapes de hidrógeno se evitarán en el recinto de la FC. Las medidas de prevención pasiva incluyen, entre otras: el uso de juntas siempre aseguradas y construidas de forma que limiten la tasa de escape máximo a un valor predecible, y la ventilación natural. Los métodos de prevención activa incluyen, entre otros: ventilación activa, un sistema de detección de gases inflamables, otros medios de detección de fugas (por ejemplo, mediante mediciones de la presión en relación con los ajustes de control).
- El interior del depósito, donde puede haber fugas o difusión de hidrógeno, no está clasificado, porque las barreras de seguridad garantizan que no haya hidrógeno peligroso ATEX en el punto de fuga o por acumulación. No obstante, todos los equipos instalados justo debajo del techo del depósito y capaces de encender mezclas inflamables de hidrógeno-aire están homologados para zona ATEX 2. En particular, se trata de los sensores de hidrógeno y fuego y del sistema de ventilación. Además, el compartimento eléctrico está sistemáticamente separado del compartimento de proceso.
- El oxígeno no es inflamable en el aire pero favorece el proceso de combustión. Una fuga de oxígeno puede originar un incendio. El riesgo de incendio aumenta cuando la atmósfera está enriquecida con oxígeno. Debe evitarse cualquier contacto entre el oxígeno y las materias orgánicas debido al riesgo de incendio.
- Se toman medidas generales de prevención de riesgos en el diseño y la explotación de este sistema:
 - Elección correcta de los materiales (por ejemplo, inoxidable desengrasados), utilización de tubos protegidos y sin codos pronunciados, tomas apretadas, etc.
 - Limitación de los caudales de oxígeno en función de la presión.
 - Protección de los conductos de oxígeno mediante filtros para atrapar el polvo susceptible de inflamarse.
 - Ventilación natural y forzada en el compartimento de proceso.
 - Longitud reducida de las tuberías bajo alta presión, riesgo suficiente de las tuberías por componentes eléctricos.
 - Reagrupación de las unidades que contienen oxígeno en una zona delimitada (compartimento).
- Cumplimiento de los procedimientos de control y mantenimiento (pruebas periódicas) de la instalación [1].

7. Aplicaciones marinas

Las pilas de combustible de hidrógeno han demostrado su rendimiento en diversas aplicaciones, como autobuses, camiones, coches, carretillas elevadoras e incluso trenes de

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

pasajeros. Gracias a su éxito en los vehículos terrestres pesados, las pilas de combustible se están integrando ahora en los barcos. Las pilas de combustible desempeñarán un papel fundamental para ayudar a las industrias marítimas a hacer frente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el agua y en los puertos.

Es bien sabido que el transporte marítimo es una fuente importante de emisiones de GEI. Las elevadas emisiones de GEI se deben al combustible tradicional de baja calidad utilizado en los motores de los barcos, que genera elevadas emisiones. En los últimos años, la presión pública sobre la contaminación atmosférica y el cambio climático ha impulsado a los gobiernos y otras autoridades a tomar medidas para reducirlas. Como resultado, se están aplicando en todo el mundo normativas de reducción de GEI centradas en el tráfico marítimo. Por ejemplo:

- [El Parlamento noruego](#) promulgó en 2018 una resolución para proteger los fiordos nacionales patrimonio de la humanidad: esta [resolución](#) suprimirá todas las emisiones de los cruceros y transbordadores en los fiordos para 2026 [22].
- [Las Normas de Emisiones Visibles](#) del [Estado de Alaska](#) limitan la opacidad de todos los buques marítimos a menos de tres millas de su costa.
- [La Organización Marítima Internacional \(OMI\)](#) ha adoptado medidas obligatorias para reducir las emisiones de GEI y eliminarlas por completo a finales de este siglo. Su estrategia inicial reducirá las emisiones totales de GEI del transporte marítimo internacional en al menos un [50% frente a los niveles de 2008 para 2050](#).
- [La Organización Europea de Seguridad Marítima \(AESM\)](#) se plantea reducir las emisiones de dióxido de carbono del transporte marítimo de la UE en al menos un [40% \(respecto a los niveles de 2005\) para 2050](#). Se están debatiendo otras ECA para el Ártico, América Central, el Mediterráneo y el Mar Negro, Japón, las Coreas y Australia.

Esta normativa sobre emisiones tendrá un impacto significativo en los buques marítimos y en las organizaciones que los operan. Para adaptarse a estos cambios, los operadores de flotas necesitan soluciones que reduzcan drásticamente las emisiones. Con tantos tipos de embarcaciones en el agua, el sector marítimo necesita una verdadera solución de cero emisiones que pueda aplicarse a los distintos tipos de buques.

Las baterías son una solución energética de cero emisiones para embarcaciones más pequeñas que operan con ciclos de trabajo cortos, por ejemplo los pequeños transbordadores de pasajeros y las embarcaciones de servicio lacustre. Sin embargo, la menor densidad de potencia y el mayor peso limitan el uso de las baterías para muchas aplicaciones. Para las embarcaciones marinas, las pilas de combustible son la única opción viable y de cero emisiones. Al igual que las baterías, las pilas de combustible producen electricidad con gran eficiencia mediante un proceso electroquímico. La diferencia es que, con una pila de

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

combustible, la energía se almacena por separado en forma de combustible de hidrógeno. Mientras haya combustible disponible, los sistemas de alimentación de pila de combustible producirán electricidad como un generador. Las únicas emisiones de una pila de combustible son el vapor de agua y el calor.

Además, el combustible de hidrógeno puede producirse a partir de fuentes renovables, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica. Y el coste del hidrógeno renovable sigue bajando [cada año](#), sobre todo porque están empezando a surgir proyectos de producción a gran escala en Europa, Australia y Chile. Cuando se alimenta con hidrógeno renovable, un sistema de alimentación de pila de combustible es una verdadera fuente de energía con cero emisiones.

Hacer la transición a una nueva fuente de energía es un empeño importante. En el caso de las pilas de combustible para embarcaciones, los obstáculos se concentran en la infraestructura de repostaje y en la disponibilidad de hidrógeno en los puertos. Antes de que los operadores puedan alimentar sus embarcaciones con pilas de combustible, cabe seguir desarrollando la infraestructura de suministro y repostaje de hidrógeno.

A corto plazo, las aplicaciones híbridas de baterías y pilas de combustible son viables. Requieren menos combustible y siguen cumpliendo el objetivo de cero emisiones. Estas aplicaciones son:

- alimentación de embarcaciones más pequeñas, como transbordadores y barcos fluviales.
- alimentar las cargas auxiliares de los buques más grandes, como los cruceros, donde la demanda de energía auxiliar es alta.
- suministrar energía en tierra a los buques atracados.

El uso de pilas de combustible para aplicaciones marinas ofrece tres ventajas fundamentales:

- Los sistemas de potencia modulares se adaptan a muchos requisitos de carga.



Figura 19 Módulo de pila de combustible marino Ballard de 100 kW

Las pilas de combustible PEM (membrana de intercambio de protones) de Ballard son modulares (Figura 19), y se pueden utilizar en varias combinaciones en paralelo para proporcionar la potencia y la redundancia que necesita un buque, desde 100kW hasta 1MW o más.

- La potencia CC es compatible con las arquitecturas eléctricas.

Las pilas de combustible PEM de Ballard son una fuente de energía de corriente continua importante y compatible con las arquitecturas eléctricas híbridas de batería. Se despliegan en configuraciones paralelas y gestionables para satisfacer los requisitos de potencia variable de:

- propulsión eléctrica híbrida.
- sistemas de energía auxiliar.
- Los sistemas de pilas de combustible tienen una configuración flexible.

En un sistema de pila de combustible, los elementos de generación de energía y de almacenamiento de combustible están separados, lo que ofrece al arquitecto del buque más flexibilidad que las baterías. El sistema de alimentación de pila de combustible Ballard tiene una configuración flexible que se adapta a las limitaciones de espacio del buque. Es divisible en varios módulos, colocados en lugares distintos. Además, los expertos de Ballard pueden evaluar los ciclos de trabajo de cualquier tamaño o tipo de buque marino. Pueden desarrollar una solución viable y práctica determinando la arquitectura óptima:

- arquitectura híbrida.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

- potencia de la pila de combustible.
- requisitos de reducción de potencia.
- requisitos de almacenamiento de combustible.
- consumo estimado de combustible.

Las pilas de combustible podrían aplicarse en varios tipos de buques, por ejemplo transbordadores, cruceros, barcos fluviales, etc. En el caso de los transbordadores, los sistemas de pilas de combustible modulares y escalables garantizan una propulsión de emisiones cero para transbordadores pequeños y grandes. Se espera que los [primeros transbordadores de emisiones cero](#) se propulsen con una arquitectura híbrida de pilas de combustible y baterías. La proporción específica de baterías y pilas de combustible dependerá de la duración de la ruta y del horario. Como las pilas de combustible suministran gran cantidad de corriente continua, también pueden proporcionar energía que se distribuya por todo el transbordador (u otro buque) para alimentar sus necesidades eléctricas auxiliares, como la iluminación, la calefacción, el aire acondicionado, la instrumentación del buque, los sistemas de emergencia, las cocinas y otros sistemas de a bordo. Para aumentar la eficiencia, el calor sobrante generado por las pilas de combustible podría aprovecharse para calentar agua para la calefacción, la ventilación, la lavandería y otros fines. El agua producida por la pila de combustible puede recuperarse si es necesario.

Las aplicaciones en cruceros pueden ser uno de los primeros usos marinos de las pilas de combustible. Algunos puertos de cruceros ya exigen un funcionamiento con cero emisiones. En los cruceros, las aplicaciones de las pilas de combustible incluyen la generación de energía para las cargas de los hoteles, los sistemas de emergencia y una parte de la potencia de propulsión. Para que el sector cumpla sus objetivos de cero emisiones en este siglo, las pilas de combustible deberían proporcionar el 100% de la energía en muchos cruceros, a medida que madure la infraestructura del hidrógeno.

Las pilas de combustible son una solución viable para la propulsión de emisiones cero en embarcaciones fluviales, incluidas las barcas que son empujadas o remolcadas por lanchas de empuje y remolcadores, y los barcos autopropulsados. Ballard ya está trabajando en un proyecto de demostración de propulsión de embarcaciones fluviales en Lyon (Francia) ([Figura 20](#)). El proyecto impulsará una lancha de empuje como buque de servicio en uno de los ríos más exigentes del mundo, el Ródano.

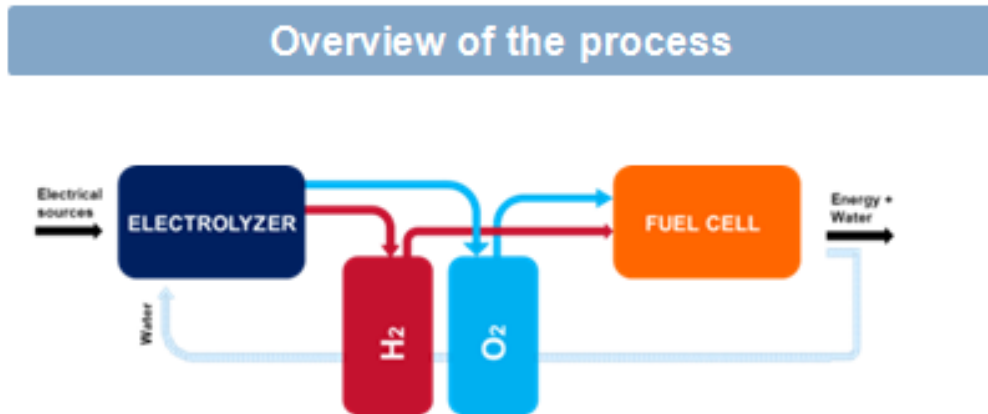


Figura 20 Proyecto de alimentación de buques fluviales de Ballard en Lyon (Francia)

En un esfuerzo por reducir la contaminación atmosférica y las emisiones de carbono, los gobiernos, las autoridades portuarias y las organizaciones de todo el mundo están endureciendo las normas sobre emisiones de los buques marítimos. Por ello, la industria naval se ve presionada para cumplir las próximas normativas de cero emisiones. La energía de las pilas de combustible de hidrógeno (una solución de cero emisiones probada para alimentar autobuses, camiones y otros transportes pesados) ofrece un potencial real para diversas embarcaciones marinas. Los sistemas de pilas de combustible alimentados por hidrógeno renovable son la solución más práctica y viable de cero emisiones. La implantación de esta tecnología es un paso fundamental para reducir las emisiones de las embarcaciones marinas y limpiar el aire para conseguir un mundo más habitable.

8. Sistemas de almacenamiento energético con base de hidrógeno

Como ejemplo de sistema de almacenamiento de energía basado en el hidrógeno, consideraremos Greenenergy Box. Greenenergy BoxTM es una cadena de hidrógeno containerizada que consta de un electrolizador, una pila de combustible, un sistema de gestión del agua y del calor, y sistemas de convertidores eléctricos acoplados a depósitos de hidrógeno y oxígeno. Greenenergy BoxTM es un sistema modular integrado que ofrece potencia de 50 a 500 kW con una capacidad de almacenamiento de 0,2 a 2 MW. Su principio se indica en la [Figura 21](#). Se pueden acoplar varios sistemas para elevar la potencia y la capacidad de energía, para desempeñar la función de sistema de reserva durante algunas horas a alta potencia [1].

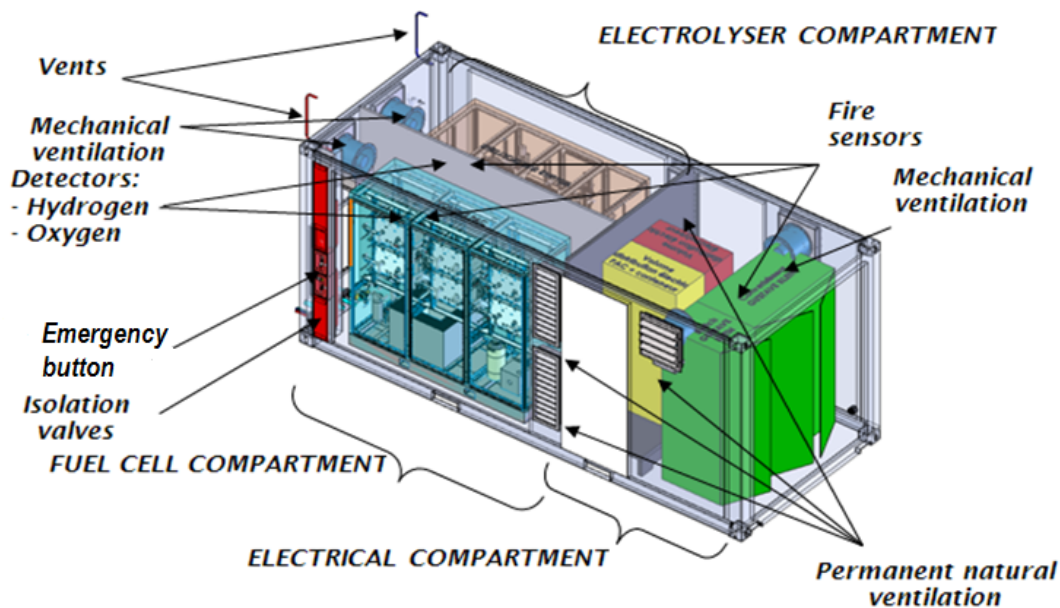


10

Figura 21 Vista general del proceso de Greenenergy Box.

Los paneles fotovoltaicos suministran electricidad a la red eléctrica y su excedente es aprovechado por el electrolizador para generar hidrógeno y oxígeno gaseosos. Una vez producidos, el hidrógeno y el oxígeno gaseosos se almacenan en tanques separados instalados junto a la Greenenergy BoxTM. Gracias al sistema de FC, el hidrógeno y el oxígeno almacenados se utilizan para producir electricidad y garantizar la autonomía energética parcial de los edificios, así como el sistema de reserva en caso de cortes de energía. La Greenenergy BoxTM gestiona por sí misma la electricidad recibida de los paneles fotovoltaicos para electrolizar el agua o proporcionar electricidad a la red. El calor, que el sistema también produce en los procesos de electrólisis y pila de combustible, también se gestiona y se aprovecha para los edificios adyacentes. Greenenergy BoxTM, resistente al agua y al viento, tiene tres compartimentos: un compartimento eléctrico, otro para la pila de combustible y un tercero para el electrolizador, como se muestra en la [Figura 22](#).

¹⁰ Overview of the process: vista general del proceso. Electrical sources: fuentes eléctricas. Electrolyzer: electrolizador. Water: agua. Fuel cell: pila de combustible. Energy + water: energía + agua.



11

Figura 22 Esquema de Greenenergy Box™ [1]

Greenenergy Box™ está certificada por la CE siguiendo la Directiva de Baja Tensión LVD 73/23/CEE, la Directiva de Compatibilidad Electromagnética EMC 89/336/CEE, la Directiva de Máquinas MD 98/37/CE y la Directiva de Equipos a Presión PED 97/23/CE. La evaluación de riesgos de este sistema se realiza en tres pasos. Primero se elabora un documento denominado "Consideraciones básicas de seguridad" en el que se describen los principales requisitos de seguridad a seguir en las fases de arquitectura y concepción de la cadena de hidrógeno. Cuando la arquitectura del sistema está lo bastante detallada, se realiza una revisión HAZOP (HAZard and OPerability Study) de cada subsistema para definir las causas potenciales de cada desviación del proceso, las posibles consecuencias asociadas y evaluar las barreras existentes. En un tercer paso, un análisis de árbol de fallos completa la revisión HAZOP para exponer los fallos de concepción, la configuración inadecuada del sistema y las fuentes externas de peligro. Todo el estudio de seguridad se recoge en un documento titulado "Síntesis de los estudios de seguridad de Greenenergy Box™ [1]. La estrategia global de seguridad de la cadena de hidrógeno se detalla a continuación en diferentes partes.

- Supresión y control de fugas.

¹¹ Electrolyser compartment: Compartimento del electrolizador. Vents: respiraderos. Mechanical ventilation: ventilación mecánica. Detectors: hydrogen, oxygen: Detectores: hidrógeno, oxígeno. Emergency button: botón de emergencia. Isolation valves: válvulas de aislamiento. Fuel cell compartment: compartimiento de pila de combustible. Electrical compartment: compartimento eléctrico. Permanent natural ventilation: ventilación natural continua.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

- Los materiales de los equipos y las tuberías se eligen para que sean compatibles con el uso del hidrógeno y el oxígeno. En particular, la fragilización del material hidrógeno y la corrosión del oxígeno se seleccionan a partir de las normas CIG 15/06, ISO/TR 15916 e ISO 11114-4. Los cilindros de acero se utilizan por lo general para almacenar hidrógeno y oxígeno a presión. El equivalente máximo de carbono para el hidrógeno es de 0,43, tal como se describe en la CIG 121/04, Art. 3.
 - Se prefieren las conexiones soldadas y se utilizan de forma práctica para minimizar las posibles fuentes de fugas. Se minimiza el número de uniones y conexiones ajustadas.
 - Tanto el electrolizador como los compartimentos de la pila de combustible en la Greenenergy Box™ incorporan dos sensores de hidrógeno y un sensor de oxígeno. Una válvula de cierre de seguridad se dispara al 10% del LII de hidrógeno (0,4 vol. de H₂ en el aire) y se produce un cierre de emergencia al 25% del LII (1 vol. de H₂ en el aire). La detección de oxígeno se activa siempre que la concentración de oxígeno alcanza más de 23 vol. % en el aire.
 - Además, las fugas de hidrógeno y oxígeno se detectan por diferencia de presión durante las fases de espera. Si un depósito o una parte de la tubería pierde presión durante una fase de espera, existe la posibilidad de una fuga. En caso de pérdida de presión pequeña durante la fase de espera, se dispara una alarma y si la pérdida de presión es muy importante, el sistema no podrá reiniciarse.
 - Antes de la puesta en funcionamiento, se realizan pruebas hidráulicas y de fugas, según establece la Directiva sobre equipos a presión.
 - Se organizan inspecciones periódicas y un programa de mantenimiento preventivo para garantizar el máximo nivel de seguridad. En particular, se realizan pruebas de estanqueidad periódicas en los reguladores de presión, válvulas, tuberías, juntas y conexiones, etc. Se organizan inspecciones visuales periódicas para comprobar el nivel de corrosión. La información relativa a la frecuencia de las inspecciones y el mantenimiento se encuentra en los Apéndices F de la CIG 121/04 y la CIG 13/02.
- Cómo prevenir la formación de atmósferas inflamables o sobreoxigenadas.
- Tres compartimentos de la Greenenergy Box™ se ventilan de forma natural gracias a los respiraderos laterales situados a ambos lados del contenedor (Figura 22).
 - Los compartimentos de pila de combustible y electrolizador están dotados de ventilación tipo ATEX, que se activa cuando la concentración de hidrógeno y oxígeno supera el 0,4 % de hidrógeno o el 23 % de oxígeno en el aire, respectivamente. Los caudales máximos se establecen para la disipación térmica, es decir, 2.500 m³/h para el compartimento de la FC y 2.700 m³/h para el compartimento del electrolizador.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

- La modelización de una fuga accidental de hidrógeno con un caudal de 750 L/min mediante el método LES (Large Eddy Simulation) desarrollado en la Universidad de Ulster revela que el sensor de hidrógeno tarda unos 10 seg en detectar una concentración de hidrógeno superior al 0,4 % vol. en el compartimento del electrolizador con ventilación natural. Considerando la hipótesis conservadora de 30 seg para un tiempo de respuesta del sensor de hidrógeno, se observa que tras 40 seg de liberación constante continua, la concentración de hidrógeno-aire formada bajo el techo sigue por debajo del LII de hidrógeno en aire, esto es, menos de 4 vol. % por aire. A partir de este momento, el sensor de hidrógeno envía una señal al mando de control, que activa el ventilador de entrada de aire a su velocidad máxima. Se observa que la nube de aire de hidrógeno se diluye por completo en menos de 2 seg.
- Supresión/reducción de fuentes de ignición.
 - El interior de la Greenenergy Box™ donde puede haber fuga o difusión de hidrógeno no está clasificado, porque las barreras de seguridad garantizan que no haya hidrógeno peligroso ATEX en el punto de fuga o por acumulación. No obstante, todos los equipos instalados justo debajo del techo del depósito y capaces de encender una mezcla inflamable de hidrógeno-aire están homologados para zona ATEX 2. En concreto, se trata de los detectores de incendios, los sensores de hidrógeno y oxígeno y el sistema de ventilación.
 - La Greenenergy Box™ y los depósitos están conectados a tierra para protegerlos contra los riesgos de las corrientes eléctricas parásitas y la electricidad estática.
- Protección contra las sobrepresiones.
 - Cada depósito y las tuberías que van de la Greenenergy Box™ a los depósitos de almacenamiento incorporan una válvula de alivio de presión (VAP). La presión de tara de la válvula de alivio de presión se ajusta para que la VAP se active cuando la presión dentro del depósito alcance 1,15 de la presión operativa máxima.
 - Los respiraderos del depósito se montan verticalmente a una altura mínima de 3 m. Incorporan un "sombbrero", cuyo peso se calibra para que se levante bajo presión a fin de evitar la entrada de agua en el respiradero.
 - La Greenenergy Box™ posee dos ventilaciones distintas de hidrógeno y oxígeno situadas a una altura mínima de 1 m sobre el techo del contenedor y bien separadas para evitar la mezcla de hidrógeno-aire enriquecida con oxígeno. Cada línea de ventilación es común al electrolizador y a la FC y permite la despresurización del sistema en menos de 2 minutos en caso de parada de emergencia.
- Parada de emergencia y de seguridad.
 - El mando de control empleado para el pilotaje automático del sistema también sirve para activar las funciones de seguridad. En el mando de control se registran unas 70 funciones de seguridad para detectar cualquier desviación del proceso o fuga de gas

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

o incendio en el sistema. Según la amplitud de la desviación comparada con el umbral de seguridad del parámetro, se dispara una parada de emergencia o de seguridad, a la que sigue el corte de energía, la despresurización del sistema, la inertización y la activación de la ventilación (salvo en caso de incendio).

- Las principales funciones de seguridad, es decir, detecciones de hidrógeno, oxígeno y fuego, tecla de apagado de emergencia y el vigilancia del mando de control, se realizan por cable lógico y respetan un NIS (Nivel de Integridad de la Seguridad) 1 [1].

9. Resumen de incidentes y accidentes

9.1 Incidentes y accidentes en los sistemas e infraestructuras de FCH

Un incidente es un acontecimiento que puede provocar la pérdida o la interrupción de operaciones, servicios o funciones, y que, de no gestionarse, puede convertirse en una emergencia, una crisis o una **catástrofe** [43], y un accidente es un acontecimiento o una circunstancia imprevista y no planificada que provoca pérdidas o lesiones. La notificación de los incidentes/accidentes ocurridos en los sistemas o infraestructuras de FCH, así como la compleja evaluación de sus principales causas y las lecciones aprendidas, constituyen un ejercicio enormemente valioso para los sectores público y privado. La información sobre accidentes o incidentes relacionados con las tecnologías FCH se puede consultar en las siguientes bases de datos conocidas:

- Lecciones sobre hidrógeno aprendidas tras incidentes y cuasi accidentes <http://h2tools.org/lessons/>
- Base de datos HIAD sobre Incidentes y Accidentes con Hidrógeno: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsp>
- Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries (BARPI) <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

Todas las bases de datos han de actualizarse periódicamente.

Por ejemplo, la base de datos H2Incidents (recientemente rebautizada como Hydrogen Tools. Lessons Learned) fue creada por el Pacific Northwest National Laboratory con financiación del Departamento de Energía de los Estados Unidos (<https://h2tools.org/lessons>). En esta base de datos, los incidentes y cuasi accidentes se comunican sin incluir los nombres de las empresas y otros detalles, de forma que la confidencialidad fomente la comunicación de los sucesos. Los incidentes se clasifican en función de los escenarios, los equipos, los daños y las lesiones, las causas probables y los factores contribuyentes [3].

Rigas y Amyotte [3] definieron las siguientes causas principales de incidentes/accidentes:

- Fallo mecánico del material o del equipo.

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

- Ataque de corrosión.
- Sobrepresurización.
- Fragilización por hidrógeno a bajas temperaturas.
- Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE - explosión de vapores en expansión de líquidos en ebullición).
- Rotura del depósito de almacenamiento por impacto de las ondas expansivas o los proyectiles de las explosiones adyacentes.
- Error humano.

En esta primera clase solo veremos algunos ejemplos de incidentes/accidentes relacionados con las tecnologías FCH. Sin embargo, las siguientes clases incluirán una serie de ejemplos relevantes para cada sistema FCH estudiado.

9.2 Accidentes ocurridos durante la producción de hidrógeno



Fuente: Millet et al, 2011 [45]

Figura 23 Partes dañadas de un electrolizador PEM de alta presión.

El 7 de diciembre de 2005 explotó un electrolizador a una presión operativa de 40 MPa en un stand de demostración de hidrógeno en la Universidad de Kyushu (Japón) [19]. Posiblemente, tras una fuga de la membrana, un fuego interno de chorro de hidrógeno-oxígeno provocó un incendio de metal (titanio) y la explosión o ruptura de la carcasa del electrolizador. El fluido interno y los productos de la combustión se liberaron en la zona circundante, incluida la zona de aparcamiento fuera del edificio del laboratorio. Los parabrisas de varios vehículos resultaron dañados por la exposición al fluoruro de hidrógeno que se formó al descomponerse un material polimérico de la membrana [19]. Un estudio francoruso [20] informó del análisis de los mecanismos de fallo de las celdas electrolíticas de agua PEM, que en última instancia pueden conducir a la destrucción del electrolizador. Se ha evidenciado un proceso de dos pasos que implica la perforación local inicial del electrolito polimérico sólido, seguida de una recombinación catalítica del hidrógeno y el oxígeno almacenados en los compartimentos de electrólisis. En la [Figura 23](#) se presentan fotografías de un accesorio de acero inoxidable y

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

una tuerca perforados por una llama de hidrógeno-oxígeno formada en el interior de la pila PEM.

9.3 Un incidente en una estación de servicio

En la estación de servicio de Emeryville se produjo un escape de hidrógeno [23]. Un PRD había fallado, se liberaron 300 kg de hidrógeno y luego se encendieron. El gas se encendió a la salida del tubo de ventilación y ardió durante 2,5 horas hasta que los bomberos locales permitieron a los técnicos entrar en la estación y detener el flujo de gas. Durante este incidente, los bomberos evacuaron los negocios y las escuelas cercanas y cerraron las calles adyacentes.

Las causas fundamentales identificadas de este suceso son:

- uso de materiales incompatibles en la fabricación del PRD.
- montaje inadecuado que dio lugar a un exceso de torsión del conjunto interior.
- endurecimiento excesivo de los materiales del conjunto interior por el fabricante de la válvula.

Estos problemas podrían haberse evitado con procesos adecuados de garantía de calidad/control de calidad durante las revisiones de diseño y seguridad.

10. Introducción al e-Laboratorio

La educación y la formación del emergente sector de las pilas de combustible y el hidrógeno (FCH) son fundamentales para el desarrollo profesional de la mano de obra actual y futura. Esto demuestra el liderazgo y la competitividad de los productos FCH europeos. En el marco del proyecto europeo "Nuevas herramientas de educación y formación basadas en aplicaciones digitales relacionadas con la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible" (NET-Tools) se desarrolló por primera vez un repositorio en línea de herramientas digitales, el e-Laboratorio. El e-Laboratorio original de NET-Tools incorpora un amplio conjunto de herramientas digitales. Las herramientas más pertinentes para los equipos de respuesta se han facilitado a través del e-Laboratorio para la Seguridad del Hidrógeno, al que se accede desde la plataforma electrónica (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) o directamente en <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>

El cálculo de las distancias de peligro basado en el rendimiento, término introducido recientemente por la norma ISO TC197 Tecnologías de Hidrógeno, es un elemento clave en la ingeniería de seguridad del hidrógeno para sistemas e infraestructuras de FCH, tales como las estaciones de servicio. Los principios del e-Laboratorio de Seguridad del Hidrógeno permiten evaluar las distancias de peligro para las emisiones no encendidas (tamaño de la

Tema 1: Introducción a la seguridad del hidrógeno para equipos de respuesta

envoltura inflamable), las emisiones encendidas (fuegos de chorro), la disipación de la onda expansiva de las deflagraciones, las detonaciones y la ruptura del tanque de almacenamiento de hidrógeno a alta presión en un incendio, las bolas de fuego, etc. Esta caja de herramientas, que la industria del hidrógeno esperaba desde hace tiempo, permite determinar las distancias de peligro para las fugas no encendidas y los incendios de chorro en régimen interactivo, por ejemplo, variando los parámetros del sistema como la presión y el diámetro de la tubería (fuga). Las herramientas de seguridad más avanzadas del e-Laboratorio de Seguridad del Hidrógeno son una versión europea ampliada de libre acceso de la herramienta HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Methods), desarrollada por Sandia National Laboratories (SNL) durante la última década con financiación del Departamento de Energía de los Estados Unidos. El e-Laboratorio demuestra el liderazgo europeo en ingeniería de seguridad del hidrógeno, por ejemplo por la capacidad de calcular las distancias de peligro determinadas por los efectos térmicos y de presión de una bola de fuego y una onda expansiva tras la rotura de un depósito en un incendio, que están ausentes en la herramienta HyRAM y el marco canadiense similar (UTRQ), aplicado mediante el entorno de desarrollo web Smalltalk Seaside.



Referencias

1. HyResponse Producto a entregar D2.1-Descripción de sistemas FCH e infraestructuras seleccionadas, características y conceptos de seguridad relevantes (2014). Disponible en: <http://www.hyresponse.eu> [consultado el 10/10/2020].
2. Mays, T. (2014). Progreso científico y cuellos de botella tecnológicos en el almacenamiento de hidrógeno. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells. 23-27 junio 2014, Creta, Grecia.
3. Rigas, F y Amyotte, P (2013). Seguridad del hidrógeno. Boca Raton: CRC press. Taylor and Francis Group.
4. Rigas, F y Amyotte, P (2013). Mitos y hechos sobre los peligros del hidrógeno. Chemical Engineering Transactions. Vol. 31.
5. ENVIRONMENTAL GRAFFITI ALPHA (2010). El desastre del Hindenburg en imágenes. Disponible en: <http://www.environmentalgraffiti.com/anthropology-and-history/news-hindenbergdisaster-accident-waiting-happen>. [consultado el 24/12/2011].
6. Foro Mundial de Armonización de Normas sobre Vehículos (WP.29), Sesión 160, Ginebra, 25-28 junio 2013.
7. US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Disponible en: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [consultado el 06/11/2020].
8. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Disponible en: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [consultado el 01/05/2014].
9. HyFLEETE-CUTE (2006-2009). Disponible en: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009> [consultado el 04/11/2020].
10. Zaetta, R and Madden, B (2011). Proyecto Next HyLights. Producto a entregar 3.1: Revisión del estado del arte de la tecnología de los autobuses de pila de combustible de hidrógeno.
11. California Fuel Cells Partnership, 2014. Disponible en: <http://cafcp.org/> [consultado el 06/11/2020].
12. Adams, P (2004). Identificación de la presión óptima de almacenamiento a bordo para autobuses urbanos de hidrógeno gaseoso. Proyecto European Integrated Hydrogen – Fase 2 (EIHP2), marzo 2004.
13. Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [consultado el 06/11/2020]



15. Dincer, I., Acar, C. (2016). Revisión del uso potencial del hidrógeno en aplicaciones de aviación. *International Journal of Sustainable Aviation*, 2: 74-100.
16. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [consultado el 06/11/2020].
17. Bicer, Y., Dincer, I. (2017). Evaluación del ciclo de vida del hidrógeno y otros posibles combustibles para aeronaves. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 10722-10738
18. Bird, L. (2011). *Dictionary of Business Continuity Management Terms*. Business Continuity Institute. Disponible en: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [consultado el 27/12/2015].
19. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering*, Parte I y Parte II. Disponible en: www.bookboon.com, libro electrónico de descarga gratuita.
20. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Disponible en: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en>
21. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. *Int J Hydrogen Energy* (2017) 42:7254-7262.
22. El parlamento noruego adopta legislación de cero emisiones en los fiordos Patrimonio de la Humanidad. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/norway-adopts-zero-emission-regulations-in-world-heritage-fjords-24820> [consultado el 04/11/2020]
23. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Investigación sobre escapes de hidrógeno en la instalación AC Transit Emeryville (Revisado). Informe Sandia. SAND2012-8642.