



Programa Europeo de Formación de Formadores para Equipos de Respuesta

Tema 12

Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

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

En esta clase se presentan detalles sobre las estaciones de servicio con sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido y gaseoso (LHRS) y la infraestructura asociada a la movilidad por hidrógeno. Se introducen los principales elementos de la cadena de suministro de hidrógeno líquido, desde la producción de hidrógeno hasta el usuario final, para una buena comprensión del funcionamiento de las LHRS. Se describen los retos y posibles riesgos que entraña el hidrógeno líquido.

Palabras clave

Hidrógeno líquido y gaseoso, estación de servicio, condiciones criogénicas, proceso, características de seguridad.

Índice

Resumen	3
Palabras clave	3
1. Público destinatario	5
1.1 Descripción de funciones: Bombero	5
1.2 Nivel de competencia: Bombero	5
1.3 Conocimientos previos: Bombero	5
2. Introducción y objetivos	5
3. Introducción a las estaciones de servicio	7
3.1 Estación de repostaje de hidrógeno gaseoso (GHRS)	7
3.2 Estación de repostaje de hidrógeno líquido (LHRS)	8
3.3 Comparación entre estaciones de servicio basadas en el almacenamiento de hidrógeno líquido y gaseoso	9
3.4 Estación de servicio basada en almacenamiento de hidrógeno gaseoso – Equipamiento	11
3.4.1 Depósitos de almacenamiento intermedio de hidrógeno gaseoso	11
3.4.2 Compresor de hidrógeno	12
3.4.3 Dispositivo de preenfriamiento	14
3.4.4 Surtidor de hidrógeno	17
3.5 Estación de servicio basada en almacenamiento de hidrógeno líquido – Equipamiento	20
3.5.1 Almacenamiento de hidrógeno líquido	22
3.5.2 Bomba criogénica	24
3.5.3 Vaporizador de HL ₂	25
3.5.4 Panel de válvulas	27
3.5.5 Depósitos intermedios gaseosos	28
3.5.6 Conexión al surtidor	29
3.5.7 Surtidor	30
4. Producción	31
4.1 Reformado de metano con vapor	31
4.2 Electrolizador	33
4.3 Licuefactor	35
5. Tuberías	38

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

6. Características de seguridad en HRS y otras infraestructuras	38
Agradecimientos	41
Referencias	42

1. Público destinatario

La información aportada en este tema está dirigida al NIVEL 1: Bombero. También hay temas 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.

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.

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.

Conocimientos previos: Bombero

EQF 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.

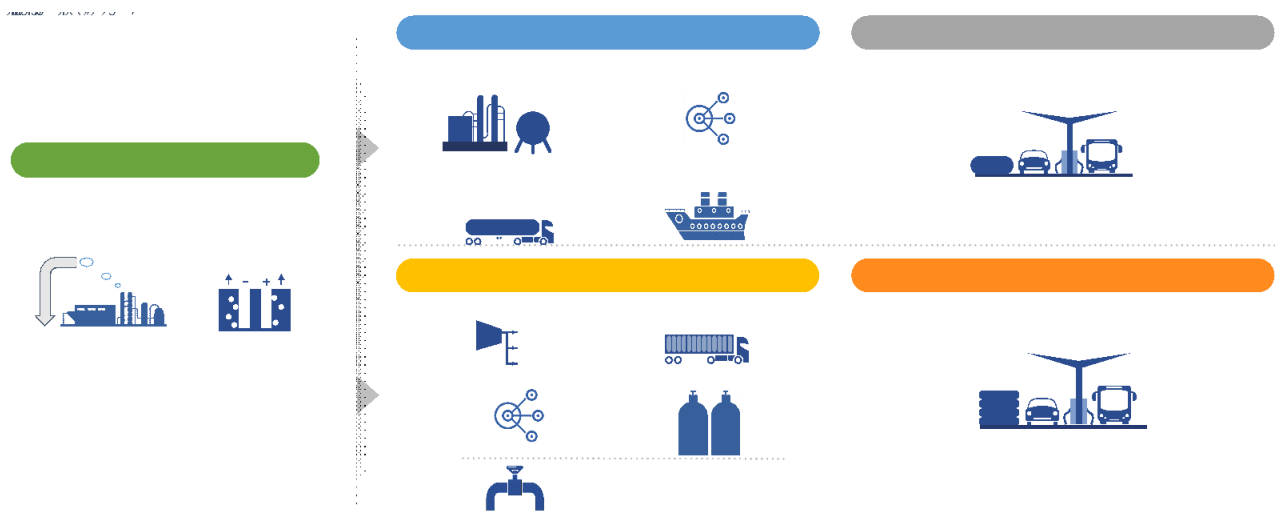
2. Introducción y objetivos

El objetivo de este documento es presentar la estación de repostaje de hidrógeno gaseoso (GHRS) y la estación de repostaje de hidrógeno líquido (LHRS), así como la infraestructura asociada a la movilidad por hidrógeno. En este tema se realizará una comparación entre las GHRS y las LHRS, y se describirán los componentes de las LHRS para comprender bien el funcionamiento, los retos y los posibles riesgos de las LHRS.

La primera pregunta antes de presentar las LHRS podría ser "¿por qué utilizar hidrógeno líquido?". Estudios sobre las HRS mostraron los principales puntos débiles :

- Cadena de suministro cara para el hidrógeno gaseoso a gran escala,
- y capacidad diaria limitada.

Dado que el HL_2 es mucho más denso que el HG_2 , es interesante desarrollar nuevos productos para aumentar la capacidad de las estaciones y disminuir el coste total de propiedad (TCO) utilizando hidrógeno líquido como materia prima. La Figura 1 muestra los diferentes elementos de la cadena de suministro del hidrógeno (líquido y gaseoso), desde la producción hasta el uso para la movilidad del hidrógeno.



¹Figura 1. Cadena de suministro del hidrógeno, desde la producción hasta el uso para la movilidad del H_2 .

¹ Primary production: Producción primaria. Steam methane reformer: Reformador de metano a vapor. Carbon capture: captura de carbono. Large electrolyser: Gran electrolizador. Liquid supply chain: Cadena de suministro líquido. Large liquefier: Gran licuefactor. Logistic tools: Herramientas logísticas. Liquid trailers & tanks: Remolques y depósitos de líquido. Liquid hydrogen maritime: Hidrógeno líquido marítimo. Gas supply chain: Cadena de suministro gaseoso. Filling center: Centro de repostaje. Gas transport: Transporte de gas. Next gen composite storage: Almacenamiento de compuestos de próxima generación. Pipeline: tubería. Light duty (cars) station: Estación para vehículos ligeros (coches). Heavy duty (buses, trains) station: Estación para vehículos pesados (autobuses, trenes).

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

La figura 2 es un esquema simplificado de la cadena de suministro de hidrógeno líquido, este nos muestra que, tras la producción de hidrógeno, se requiere un licuador para licuar el hidrógeno a temperatura criogénica. A continuación, las cisternas de HL_2 (con una capacidad de hasta 4 t de H_2) se encargan de transportar el hidrógeno hasta la LHRS, donde la transferencia al depósito de la LHRS se realiza mediante un pequeño vaporizador. Este tema se centra precisamente en los detalles de estos diferentes pasos y los equipos necesarios.

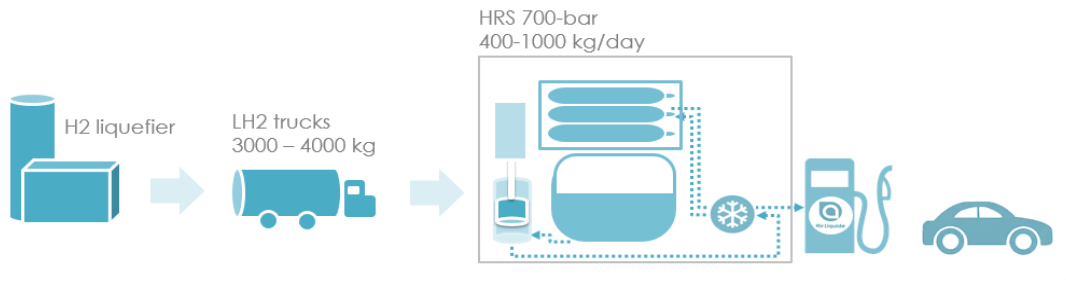


Figura 2. Cadena de suministro de hidrógeno líquido para las estaciones de servicio de hidrógeno.

Al final de este tema, los intervinientes/formadores conocerán:

- la cadena de suministro de hidrógeno - desde la producción hasta su uso,
- el diseño y el funcionamiento de las GHRS y LHRS,
- el equipamiento necesario en las GHRS y LHRS,
- los métodos de producción de hidrógeno,
- las características de seguridad en las GHRS y LHRS e infraestructuras conexas

² Liquefier: liquefactor. Trucks: camiones. Bar: bares. Day: día.

3. Introducción a las estaciones de servicio

3.1 Estación de repostaje de hidrógeno gaseoso (GHR)

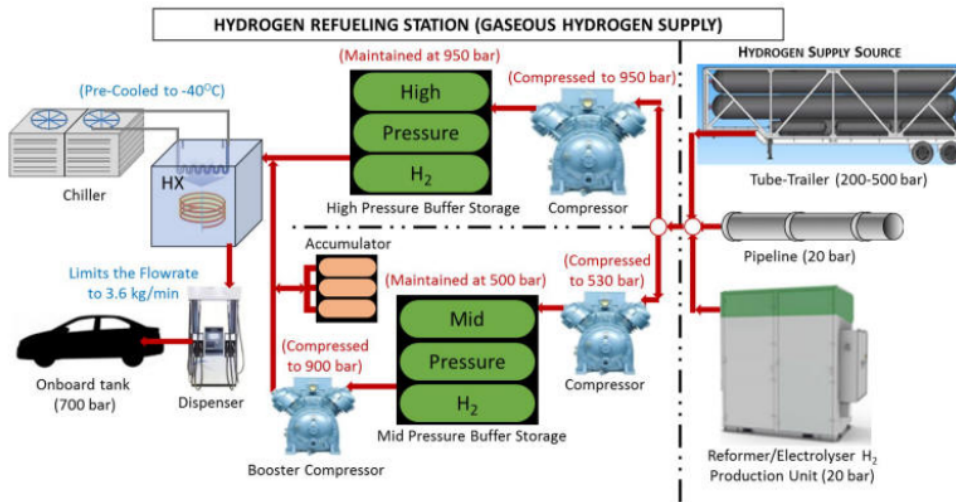


Figura 3 Imagen de un ejemplo de estación de repostaje de hidrógeno gaseoso (GHR) [1]

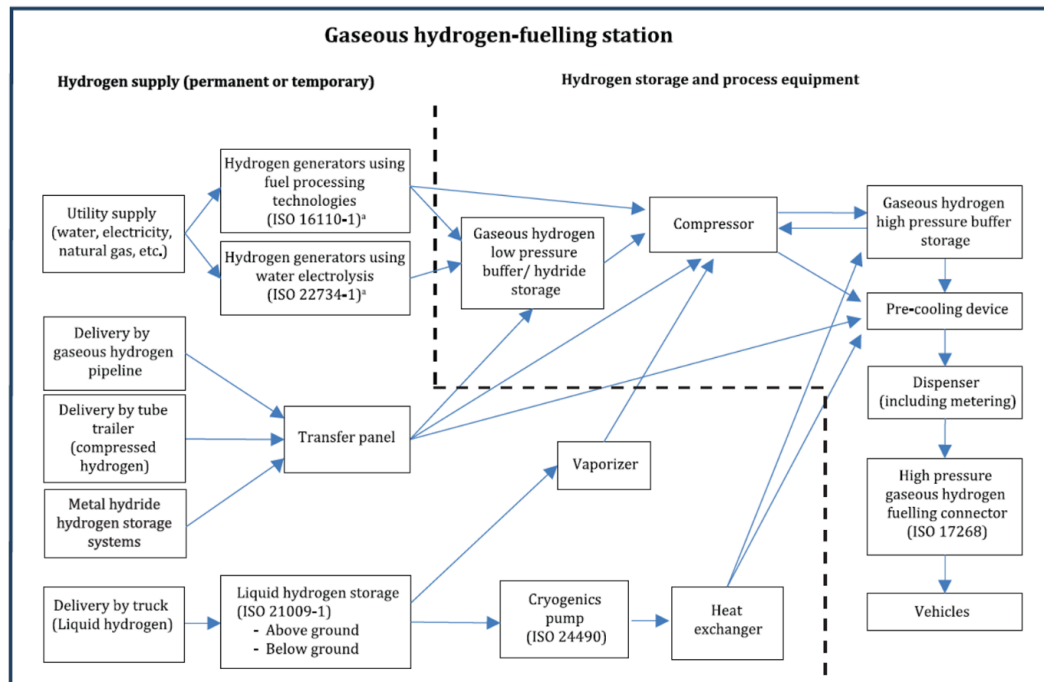
Generalmente, el transporte de hidrógeno gaseoso desde el suministro hasta el depósito de un vehículo sigue un proceso de compresión para alcanzar 950 bares en un almacenaje intermedia de alta presión o 500 bares en un almacenaje intermedio de media presión, y luego pasa por un intercambiador de calor y llega al surtidor para el repostaje de los vehículos de pila de combustible (FCV). Como se muestra en la Figura 3, una GHR típica incluye depósitos de almacenamiento intermedio de hidrógeno gaseoso, compresores de hidrógeno, dispositivos de preenfriamiento y un surtidor de hidrógeno. Los requisitos mínimos de diseño, instalación, puesta en servicio, funcionamiento, inspección y mantenimiento para la seguridad y, en su caso, para el rendimiento de las estaciones de repostaje de hidrógeno en estado gaseoso (GHR) públicas y no públicas que suministran hidrógeno gaseoso a vehículos ligeros (por ejemplo, FCV) se tratan en la norma ISO 19880-1:200 (E) [2], en la que se establecen los requisitos mínimos para las GHR. Muchos de los requisitos genéricos son aplicables a las estaciones de repostaje para otras aplicaciones del hidrógeno, entre las que se incluyen las siguientes:

- Estaciones de servicio para motocicletas, carretillas elevadoras, tranvías, trenes y aplicaciones fluviales y marinas;

³ Hydrogen refueling station (gaseous hydrogen supply): estación de repostaje de hidrógeno (suministro de hidrógeno gaseoso). Pre-cooled to: preenfriado a. Chiller: refrigerador. Maintained at: mantenido a. High pressure buffer storage: almacenamiento intermedio de alta presión. Bar: bares. Compressed to: Comprimido hasta. Compressor: compresor. Hydrogen supply source: Fuente de abastecimiento de hidrógeno. Tube-trailer: remolques tubulares. Limits the flowrate to: Limita el caudal a. Onboard tank: depósito a bordo. Dispenser: surtidor. Accumulator: acumulador. Booster compressor: compresor booster. Mid pressure buffer storage: almacenamiento intermedio de media presión. Pipeline: tubería. Reformer/electrolyser: reformador/electrolizador. Production unit: unidad de producción.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

- Estaciones de servicio con surtidor interior;
- Aplicaciones residenciales para repostar vehículos terrestres;
- Estaciones de servicio móviles; y
- Estaciones de repostaje para demostración no públicas.



a - Puede incluir un depósito intermedio (o acumulador) para amortiguar o ajustar el flujo de la entrada de aspiración del compresor.

Figura 4 Ejemplo de elementos típicos de una estación de servicio con suministro de hidrógeno [2]

Este tema está dedicado al almacenamiento de hidrógeno y el equipo para procesarlo (a la derecha de la línea de puntos de la Figura 4), incluidos depósitos de hidrógeno gaseoso a baja y alta presión, compresor, dispositivo de preenfriamiento, surtidor (incluyendo contador), conector de abastecimiento de hidrógeno gaseoso a alta presión y vehículos. En la norma ISO

⁴ Gaseous hydrogen-fuelling station: estación de repostaje de hidrógeno gaseoso. Hydrogen supply: (permanent or temporary): suministro de hidrógeno (permanente o temporal). Hydrogen storage and process equipment: almacenamiento de hidrógeno y equipos de proceso. Unity supply (water, electricity, natural gas, etc.): unidad de suministro (agua, electricidad, gas natural, etc.). Hydrogen generators using fuel processing technologies: generadores de hidrógeno que utilizan tecnologías de procesamiento de combustibles. Hydrogen generators using water electrolysis: generadores de hidrógeno que utilizan electrólisis del agua. Delivery by gaseous hydrogen pipeline: Suministro mediante tuberías de hidrógeno. Delivery by tube trailer (compressed hydrogen): Suministro mediante remolque tubular (hidrógeno comprimido). Metal hydride hydrogen storage systems: Sistemas de almacenamiento de hidrógeno con hidruros metálicos. Transfer panel: panel de transferencia. Delivery by truck (liquid hydrogen): Suministro mediante camión (hidrógeno líquido). Liquid hydrogen storage: Almacenamiento de hidrógeno líquido. Above ground: en la superficie. Below ground: bajo tierra. Cryogenics pump: bomba criogénica. Vaporizer: vaporizador. Heat exchanger: intercambiador de calor. Gaseous hydrogen low pressure buffer/hydride storage: depósitos intermedios de hidrógeno gaseoso de baja presión/almacenamiento de hidruros. Compressor: compresor. Gaseous hydrogen high pressure buffer storage: depósitos intermedios de hidrógeno gaseoso de alta presión. Pre-cooling device: dispositivo de preenfriamiento. Dispenser (including metering): surtidor (incluyendo contador). High pressure gaseous hydrogen fuelling connector: conector de abastecimiento de hidrógeno a alta presión. Vehicles: vehículos.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

17268 se ofrecen orientaciones sobre el conector de abastecimiento de hidrógeno a alta presión.

3.2 Estación de repostaje de hidrógeno líquido (LHRS)

Antes de presentar con más detalle cuáles son los principales componentes de una estación de servicio basada en el almacenamiento de hidrógeno líquido, es interesante mostrar una estación existente y en funcionamiento. En la Figura 5 se representa la estación de repostaje de hidrógeno líquido Linde instalada en Oakland (EE.UU.).



Figura 5 Linde LHRS en Oakland.

El diseño se presenta en la Figura 6, con el fin de valorar la huella de una instalación así.

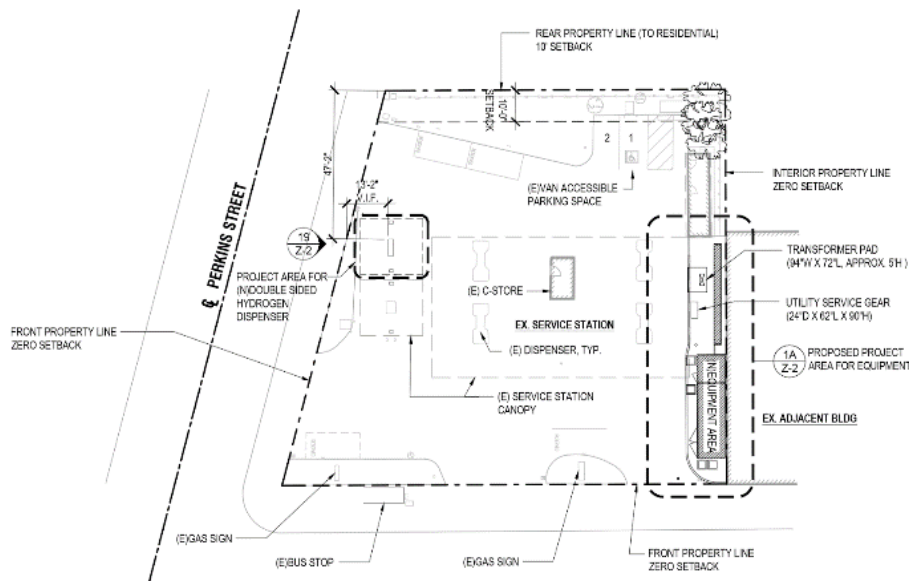


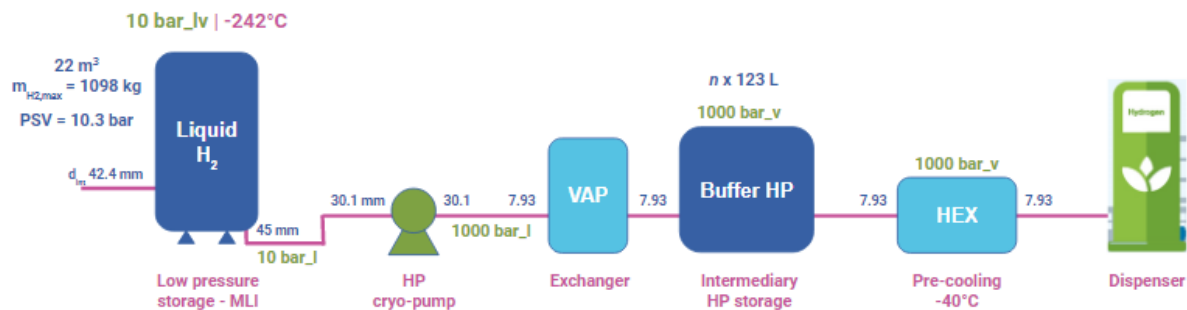
Figura 6. Diseño de LHRS Linde.

3.3 Comparación entre estaciones de servicio basadas en el almacenamiento de hidrógeno líquido y gaseoso

En principio, una estación de servicio con depósitos de HL_2 consta de:

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

- un depósito de HL_2 (alrededor de 20 m^3 - 1000 kg-H_2) con una presión operativa máxima de 10,3 bares,
- una línea de proceso aislada desde el fondo del depósito hasta la bomba de HL_2 , que conduce el HL_2 desde el tanque de almacenamiento hasta un vaporizador; este dispositivo permite bombear HL_2 hasta a 1000 bares (100 MPa),
- un calentador (denominado VAP: aceite caliente, eléctrico para calentar el hidrógeno a 1000 bares (100 MPa)),
- depósitos intermedios de gas a 1000 bares (100 MPa) (varios m^3); estos almacenamientos intermedios son generalmente de grupos de tanques de tipo I o II (cilindros metálicos o botellones).



5

Figura 7 Boceto simplificado de una estación de repostaje de hidrógeno líquido.

Las demás partes (e.g. surtidor, manguera de llenado...) de la estación de servicio son similares a una estación de servicio clásica de hidrógeno gaseoso (véase comparación en Figura 8).

⁵ Liquid: líquido. Bar: bares. Cryo-pump: criobomba. Buffer: Almacenamiento intermedio. Exchanger: intercambiador. Pre-cooling: preenfriamiento. Dispenser: surtidor.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

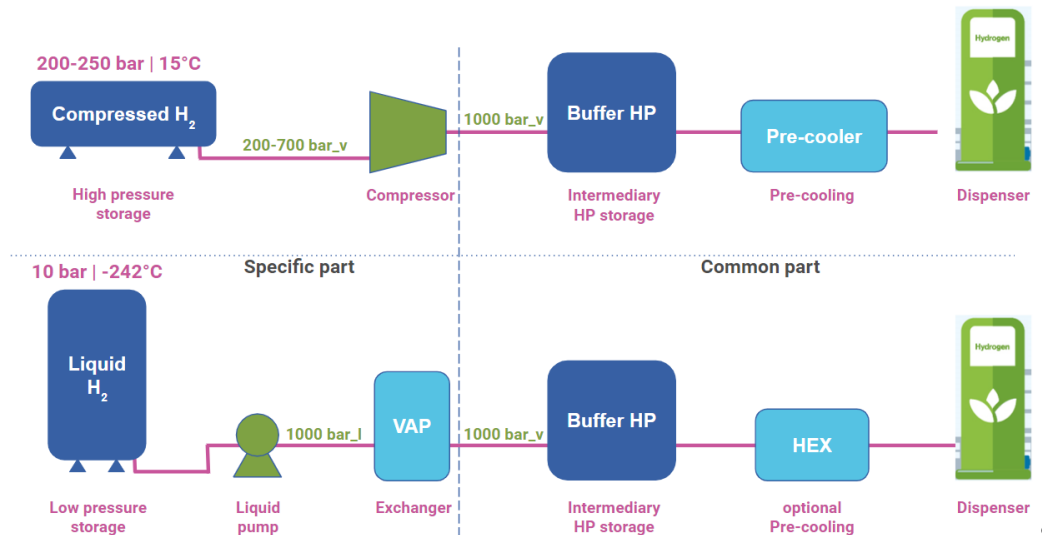


Figura 8. Comparación simplificada entre estaciones de repostaje de hidrógeno líquido y gaseoso. Arriba: ERH gaseoso, abajo ERH líquido.

La Tabla inferior resume las principales diferencias entre LHRS y HRS.

Tabla 1. Comparación entre LHRS y HRS

Tema	LHRS	HRS
Almacenamiento	Hidrógeno líquido, temperatura criogénica (-240°C), baja presión (hasta 10 bares)	Hidrógeno gaseoso, temperatura ambiente, alta presión (entre 200 y 500 bares)
Recarga de la estación	Transferencia de hidrógeno líquido del remolque al depósito	Principalmente intercambio (= lleno por vacío)
Presurización del hidrógeno	Bomba de líquido y vaporizador necesarios para suministrar H ₂ gaseoso	Compresor

3.4 Estación de servicio basada en almacenamiento de hidrógeno gaseoso – Equipamiento

3.4.1 Depósitos de almacenamiento intermedio de hidrógeno gaseoso

Los depósitos de almacenamiento intermedio, ya sean de alta o de baja presión, están diseñados para almacenar hidrógeno comprimido, y pueden situarse entre un generador de hidrógeno y un compresor para un flujo uniforme de gas hacia el compresor o entre el

⁶ Compressed: comprimido. High pressure storage: almacenamiento de alta presión. Compressor: compresor. Intermediary HP storage: almacenamiento intermedio de alta presión. Pre-cooler: preenfriador. Low pressure storage: almacenamiento de baja presión. Liquid pump: bomba de líquido. Optional: opcional.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

compresor y el sistema de distribución para la acumulación de gas a presión óptima para el repostaje de vehículos.

Los recipientes para almacenamiento de hidrógeno gaseoso deben fabricarse de acuerdo con una norma nacional/regional de uso común y estar diseñados para la vida útil prevista. El almacenamiento intermedio puede incluir el hidrógeno absorbido en un sistema de almacenamiento de hidruros metálicos.

Si se interconectan depósitos de almacenamiento intermedio con diferentes presiones de diseño, estos deben protegerse de tal manera que los recipientes clasificados para una presión baja no puedan sobrepresurizarse debido a un mal funcionamiento.

El diseño de la instalación de almacenamiento intermedio incluirá los medios adecuados para prevenir el fallo en caso de incendio cuando la evaluación de riesgos lo considere necesario. Los métodos de prevención adecuados pueden incluir uno o varios de estos aspectos:

- Sistemas de ventilación del producto, como los TPRD;
- Blindaje térmico o barrera contra incendios;
- Imposibilidad de que un líquido inflamable se acumule bajo el recipiente;
- Protección fija contra el fuego.

Cabe destacar que los depósitos de almacenamiento de Composite pueden requerir una mayor protección en comparación con los recipientes metálicos. Los recipientes deberán estar fijados a los cimientos, y los cimientos y los soportes deberán ser capaces de soportar las fuerzas que se prevean para el emplazamiento. El diseño de la disposición de los depósitos de almacenamiento intermedio de hidrógeno gaseoso y de las tuberías deberá tener en cuenta el riesgo de impacto directo de las llamas de chorro procedentes de posibles puntos de fuga o respiraderos sobre un recipiente adyacente. La evaluación de riesgos de la estación incluirá consideraciones de mitigación sobre deflagración a detonación (DDT) en la zona de hidrógeno comprimido. Cada grupo de depósitos de almacenamiento intermedio, que puede estar aislado con válvulas manuales o automáticas, deberá estar equipado con su propio conjunto de dispositivos de seguridad.

Cabe señalar que cuando el hidrógeno se suministra en botellas transportables, **camiones cisterna** o Contenedores de Gas de Elementos Múltiple (MEGs)⁷, no siempre se incluyen dispositivos de seguridad dentro del cilindro/grupo de recipientes. Sin embargo, cuando se incorporan cilindros transportables, **remolques tubulares** o MEGC a una estación de servicio,

⁷ Conjunto multimodal de botellas, tubos o juegos de botellas interconectados por un colector y ensamblados dentro de un marco, incluido el equipo de servicio y el equipo estructural necesario para el transporte de los gases.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

tras una evaluación de riesgos adecuada que aborde las consideraciones de diseño potencialmente diferentes, en particular los ciclos de presión, cualquier sistema de compresión in situ que pueda comprimir hidrógeno en un sistema de este tipo deberá incluir un conjunto de dispositivos de seguridad para proteger los tubos de almacenamiento frente a la sobrepresurización.

3.4.2 Compresor de hidrógeno

Cada compresor estará equipado con dispositivos de alivio de presión, o sistemas equivalentes de seguridad para evitar la sobrepresión. El compresor y los sistemas auxiliares, en su caso, serán compatibles con su uso en el sistema de tuberías. Debe preverse una compensación suficiente de las posibles vibraciones o movimientos del compresor, para que no se dañen los sistemas de tuberías y no se produzcan fugas. Los compresores deben diseñarse específicamente para su uso con hidrógeno y para minimizar la introducción de contaminantes. Se evitará en todo momento la entrada de aire en la toma del compresor para prevenir la formación de mezclas inflamables. Se evaluarán los riesgos asociados a la instalación, el mantenimiento y el funcionamiento de los compresores, y se definirán y aplicarán contramedidas para proteger los equipos y evitar que se produzcan sucesos potencialmente peligrosos. Cada compresor debe estar equipado con medios para despresurizar completamente todas las partes del sistema en las labores de mantenimiento. Cuando la evaluación de riesgos de un sistema de compresores recomiende el uso de una purga inerte, se proporcionarán medios para purgar el compresor con gas inerte antes de las operaciones de mantenimiento, incluyendo un procedimiento por escrito, para permitir una inertización efectiva.

Debe preverse una compensación suficiente de las vibraciones y los movimientos entre los sistemas interconectados en una estación de servicio de hidrógeno y entre las tuberías de hidrógeno gaseoso y las tuberías de aspiración del compresor para evitar las fugas causadas por las vibraciones y los movimientos. Cualquier vibración que pueda afectar a la resistencia de las tuberías, los accesorios y los componentes no se deberá transferir a las tuberías.

Se realizarán controles de seguridad para garantizar que los niveles de temperatura y presión no superen o caigan por debajo de los niveles de funcionamiento establecidos, por ejemplo para la presión de entrada, la temperatura y la presión de descarga, y el sistema de control se activará una alarma y/o una parada, según proceda, o medidas alternativas adecuadas. Además de los instrumentos y controles normalmente previstos para los sistemas de compresión de gas, han de considerarse las salvaguardias específicas para hidrógeno detalladas a continuación.

Se evitará en todo momento la entrada de aire en la toma del compresor para prevenir la formación de mezclas inflamables. Si esta condición ya no se garantiza, será preciso

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

desconectar el compresor. Por ejemplo, la presión de entrada se debe supervisar con un indicador/interruptor de presión, con el sistema de control emitiendo una alarma y/o parada según convenga, para evitar un vacío en la línea de entrada y la consecuente entrada de aire. Este indicador/interruptor de presión debe asegurar el apagado del compresor antes de que la presión de entrada alcance la presión atmosférica.

Si existe la posibilidad de contaminación por oxígeno en condiciones normales de funcionamiento debido a una baja presión de entrada, la medición del contenido de oxígeno en el hidrógeno puede considerarse una medida de seguridad durante la evaluación de riesgos. Por ejemplo, si el contenido de oxígeno alcanza una fracción volumétrica del 1%, el compresor se puede apagar de modo automático. Es posible adoptar medios alternativos para evitar situaciones críticas.

La temperatura después de la etapa final de compresión, o después del refrigerador, si este está instalado, se supervisará mediante un indicador/interruptor de temperatura, y el sistema de control activará una alarma y/o una parada, según convenga, a una temperatura máxima predeterminada.

La presión después de la última etapa de compresión será supervisada por un indicador/interruptor con el sistema de control activando una alarma y/o una parada, según convenga, o iniciando acciones alternativas, como el reciclaje, a una presión máxima predeterminada que sea inferior a la de la protección contra la sobrepresión.

El sistema de agua de refrigeración debe controlarse con un indicador/interruptor, y el sistema de control debe activar una alarma y/o una parada, según convenga, en caso de baja presión, bajo flujo o alta temperatura.

Cuando el motor y los equipos auxiliares se purguen con un gas inerte, o se protejan mediante presurización con aire comprimido o un gas inerte, la presión o el caudal bajo se indicará con una alarma, que se dispondrá para apagar el motor y los equipos auxiliares según lo dispuesto en la norma IEC 60079-2.

Cuando el cárter del compresor se purgue con un gas inerte o se proteja mediante presurización con aire comprimido o un gas inerte, la presión o el caudal bajo se indicará con una alarma, que se dispondrá para desconectar el compresor.

3.4.3 Dispositivo de preenfriamiento

El preenfriamiento es un proceso de disminución de la temperatura del **combustible** hidrógeno antes de su dispensación. El coste de la unidad de preenfriamiento supone aproximadamente el 10% del coste total del equipo en la GHRS [3] y es necesario conocer en profundidad este componente de gasto para reducir al máximo los costes de la GHRS. A diferencia de los estudios sobre sistemas de compresión y almacenamiento, la información

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

disponible sobre la unidad de preenfriamiento es bastante limitada. El preenfriamiento del **combustible** hidrógeno antes de que se dispense en el depósito del vehículo es fundamental para evitar el sobrecalentamiento del depósito. El protocolo de repostaje SAE J2601 establece un proceso de repostaje limitado para garantizar un llenado seguro y rápido de los FCV [4].

El protocolo de repostaje SAE J2601 establece un rango de temperatura de preenfriamiento del hidrógeno para cada tipo de estación de servicio de hidrógeno; por ejemplo, una estación T40 debe preenfriar el hidrógeno a una temperatura de entre -33 y -40 °C antes de dispensarlo a los FCV. Situada entre la unidad de almacenamiento intermedio de alta presión y el surtidor, la unidad de preenfriamiento preenfria el hidrógeno gaseoso hasta una temperatura de al menos -33 °C en los 30 segundos siguientes al inicio del repostaje. Luego mantiene una temperatura en ese rango establecido durante todo el repostaje.

La velocidad a la que pueden repostar los FCV está directamente relacionada con la temperatura de preenfriamiento del hidrógeno, la temperatura ambiente y la presión inicial del depósito [5], entre otros factores. Cuanto mayor sea la temperatura ambiente, más tiempo se tardará en llenar el depósito, y viceversa. Sin embargo, entre estos tres factores clave, el preenfriamiento es el que más influye en el tiempo de repostaje. Dado que el tiempo de repostaje es uno de los parámetros críticos que afectan al proceso de repostaje de los FCV, el sistema de preenfriamiento debe diseñarse para proporcionar la tasa y la capacidad de repostaje necesarias en condiciones extremas, y al menor coste posible.

Una unidad convencional de preenfriamiento en una GHRS utiliza un ciclo de refrigeración termodinámico; hace circular un refrigerante a través de un compresor de dos etapas, un condensador, una válvula de expansión termostática y un intercambiador de calor del evaporador (Figura 9). Este ciclo de refrigeración implica un subenfriamiento del refrigerante para maximizar el efecto de refrigeración en el evaporador, haciendo circular una parte del refrigerante que sale del condensador a través de la válvula de expansión, el intercambiador de calor del subenfriador y la segunda etapa del compresor. El hidrógeno dispensado se preenfria liberando energía al refrigerante de baja temperatura a través del intercambiador de calor del evaporador. El intercambiador de calor del evaporador puede diseñarse con una gran masa térmica (principalmente para actuar como **amortiguador** y reducir así la capacidad de refrigeración necesaria), o puede tener un diseño compacto por motivos de **embalaje**.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

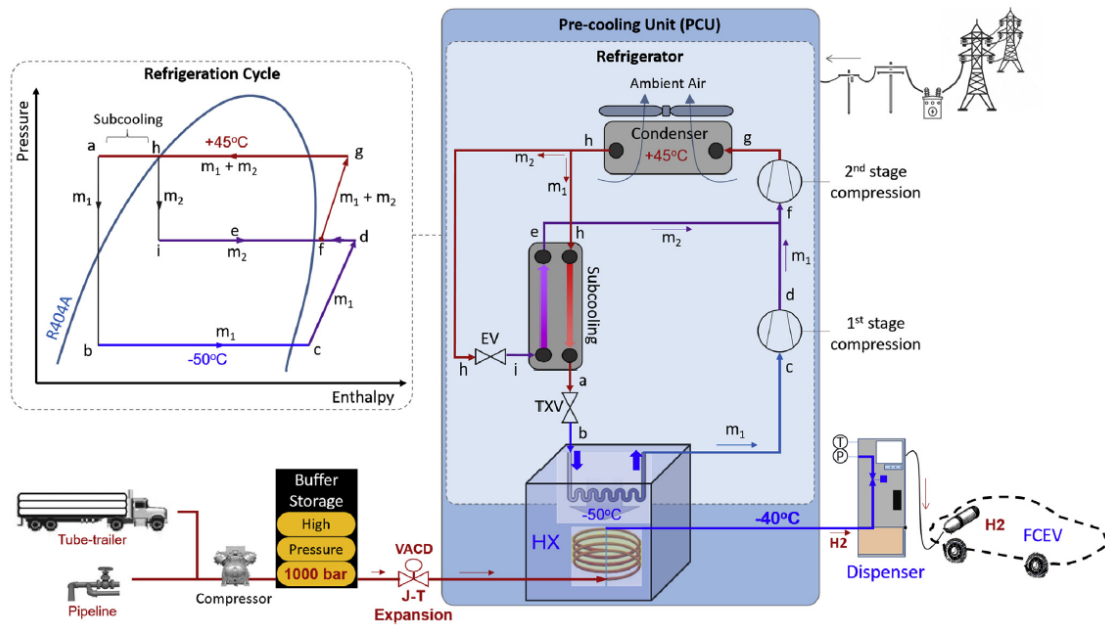


Figura 9 Diagrama esquemático del funcionamiento de la unidad de preenfriamiento en un GHRS compuesto por compresor, almacenamiento intermedio de alta presión, unidad de preenfriamiento y dispensador.

Dos factores principales afectan al rendimiento de la refrigeración y al dimensionamiento de la unidad de preenfriamiento: el proceso de expansión J-T (Tema 2) en el dispositivo de control de área variable (VACD) antes del intercambiador de calor de preenfriamiento, y el requisito de la estación de ser capaz de llenar un número determinado de vehículos back-to-back (B2B). El efecto J-T está relacionado con la temperatura de entrada del combustible hidrógeno que fluye hacia la unidad de preenfriamiento, mientras que el requisito de llenado B2B guarda relación con la demanda máxima de combustible por hora en el surtidor [6].

El efecto J-T se refiere al cambio de temperatura de un gas cuando pasa por una válvula a entalpía constante (expansión adiabática). Todos los gases tienen una "temperatura de inversión" por debajo de la cual experimentan un descenso térmico durante el proceso de expansión J-T. La temperatura de inversión está directamente relacionada con la temperatura crítica del gas. Las sustancias con una temperatura crítica extremadamente baja (por ejemplo, el hidrógeno, el helio y el neón) tienen temperaturas de inversión muy por debajo de la temperatura ambiente y, por tanto, sus temperaturas aumentan durante la expansión isentálpica por encima de sus temperaturas de inversión ($< 497,15^\circ \text{C}$ para el hidrógeno). Cuando el hidrógeno a alta presión procedente del almacenamiento intermedio fluye a través

⁸ Refrigeration cycle: ciclo de refrigeración. Pressure: presión. Enthalpy: entalpía. Subcooling: subenfriamiento. Pre-cooling unit: unidad de preenfriamiento. Refrigerator: refrigerador. Condenser: condensador. Ambient air: aire ambiental. Stage compression: fase de la compresión. Tube-trailer: remolque tubular. Pipeline: tubería. Compressor: compresor. Buffer storage: almacenamiento intermedio. High pressure: alta presión. Bar: bares. Expansion: expansión. Dispenser: surtidor.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

de un VACD, experimenta una caída de presión mientras se expande. La expansión del hidrógeno y la caída de presión en el VACD hacen que la temperatura del gas hidrógeno aumente, ya que el hidrógeno tiene coeficientes JT negativos a la presión y temperatura de expansión (aproximadamente $-273,2 \text{ °C/bar}$ a 900 bares y $-273,18\text{°C/bar}$ a 1 bar y 25 °C) [7]. Dicho esto, la máxima caída de presión a través del VACD teóricamente podría hacer que la temperatura del combustible hidrógeno aumentara en 40 °C antes de entrar en el intercambiador de calor para preenfriamiento. Este aumento térmico significativo podría suponer una carga adicional para la unidad de preenfriamiento, por lo que se precisaría más potencia de refrigeración para compensar la mayor caída de temperatura requerida en el intercambiador de calor. Del mismo modo, un incremento del número de llenados B2B que la estación debe satisfacer puede aumentar la capacidad necesaria de la unidad de preenfriamiento, porque el intercambiador de calor se dimensionará para la demanda B2B máxima, aunque la demanda durante la mayor parte del día sea mucho menor.

El número deseado de llenados B2B tiene una gran repercusión en las capacidades y los costes de los componentes de repostaje. En el repostaje B2B, un FCV tras otro se acercan al surtidor para repostar, con una breve pausa de unos 2 minutos entre llenados [6]. La falta de tiempo de inactividad durante una serie de llenados B2B da poco tiempo para que los componentes de la GHRs se recuperen y recarguen. Un número elevado de repostajes B2B (por ejemplo, 5) aumentará la carga del intercambiador de calor, de modo que la capacidad de su masa térmica para mantener la temperatura del hidrógeno por debajo de -33 °C se verá comprometida. En esos casos, el sistema de refrigeración puede no tener tiempo suficiente para enfriar el intercambiador de calor entre llenados. Si no se considera la demanda máxima asociada al repostaje B2B en el diseño de los componentes de repostaje, la unidad de preenfriamiento puede quedar infradimensionada, lo que pondría en riesgo el rendimiento del repostaje y la satisfacción del cliente.

Además del efecto J-T y del repostaje B2B, es importante considerar el equilibrio entre los diferentes conceptos de diseño de la unidad de preenfriamiento. Una unidad de preenfriamiento puede equiparse con un intercambiador de calor con una masa térmica mayor que sea capaz de mantener un pequeño cambio térmico mientras se enfría el flujo de hidrógeno, por lo que precisaría menos potencia de enfriamiento del sistema de refrigeración. Por otra parte, un intercambiador de calor compacto debe admitir una potencia frigorífica que satisfaga la carga de refrigeración instantánea (es decir, que garantice refrigeración a demanda). Además, debido a su menor efecto amortiguador (por su menor masa térmica), la capacidad de refrigeración con un intercambiador de calor compacto será más sensible a los factores que afectan a su temperatura de entrada, como la temperatura ambiente y el efecto J-T aguas arriba del intercambiador de calor.

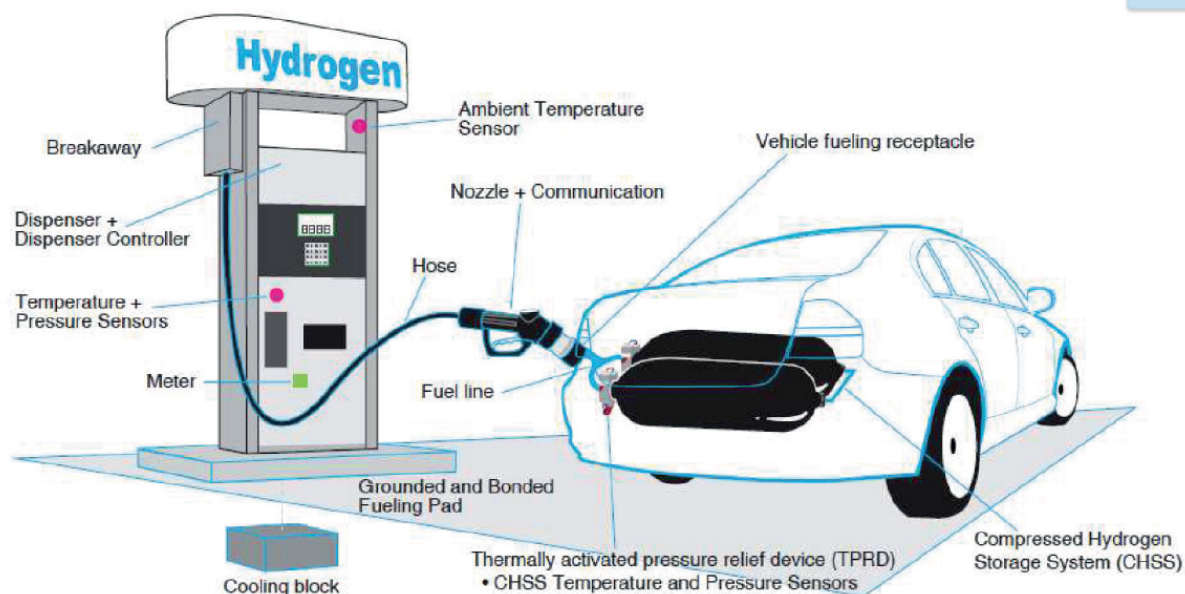
Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

A temperaturas ambiente más altas, la temperatura del hidrógeno en la entrada del intercambiador de calor aumentará, por lo que puede ser necesario un bloque de intercambiador de calor con una masa térmica mayor para mantener su temperatura dentro del rango de diseño. Sin embargo, en un sistema de intercambiador de calor compacto, una mayor temperatura ambiente debe contrarrestarse con más potencia de refrigeración a demanda. Una de las desventajas termodinámicas de tener un intercambiador de calor con una gran masa térmica es que consume más energía para la refrigeración superior (para mantener el intercambiador de calor a -40 °C) que su homólogo compacto. Por otro lado, una configuración de refrigeración con intercambiador de calor compacto a demanda necesita un refrigerador más potente, pero consume menos energía para la refrigeración superior. En otras palabras, hay un equilibrio entre la capacidad de refrigeración y la masa térmica del intercambiador de calor. En lo relativo a costes, un intercambiador de calor compacto tiende a tener una estructura más compleja para la transferencia rápida de calor a demanda, por eso su coste de fabricación es probablemente mayor que el de un intercambiador de calor con una gran masa térmica. No obstante, el pequeño tamaño del sistema hace que los costes de material, envío e instalación de los intercambiadores de calor compactos sean bajos comparados con los grandes intercambiadores de calor de masa térmica.

Si se utiliza el preenfriamiento del hidrógeno dispensado, el sistema de dispensación debe dotarse de un medio para confirmar que la temperatura del combustible del surtidor preenfriado es correcta y que el control cumple los límites de temperatura superior e inferior del protocolo de repostaje. Si el protocolo de repostaje utiliza la comunicación de la temperatura del depósito en el vehículo y se produce un fallo en la comunicación, el protocolo deberá realizar una parada, o continuar con un repostaje sin comunicación si así lo permite el protocolo.

3.4.4 Surtidor de hidrógeno

El sistema de surtidor está situado después del sistema de suministro de hidrógeno y comprende todo el equipo necesario para llevar a cabo la operación de repostaje del vehículo, para suministrar hidrógeno comprimido al vehículo. El surtidor de hidrógeno es un equipo del sistema de dispensación que incluye el armario del surtidor y la estructura de soporte, ubicada físicamente en la zona de repostaje.



9

Figura 10 Ejemplo de componentes clave del sistema de dispensación en una estación de servicio [2]

La Figura 10 ilustra un ejemplo de los componentes clave del sistema de dispensación de la estación de servicio, incluido el sistema de hidrógeno a alta presión del FCV, que comprende, entre otros, el receptáculo y el sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido (CHSS) con sensores, así como los dispositivos de alivio de presión. El CHSS cuenta con dispositivos de alivio de presión activados térmicamente para protegerlo contra la sobrepresión debida a un incendio. En un lateral de la estación, hay un sistema de control del sistema de dispensación automatizado (por ejemplo, mediante un controlador lógico programable (PLC)) para realizar el repostaje, así como detección de fallos y gestión de procedimientos. La estación también tiene un dispositivo de protección contra la sobrepresión, como un dispositivo de alivio de presión o equivalente, para proteger contra la sobrepresurización del sistema de dispensación y del vehículo.

El surtidor de una estación de servicio pública para vehículos ligeros suele estar diseñado con boquillas separadas para abastecer de combustible a los vehículos a presiones de trabajo nominales de 350 bar y/o 700 bar. El surtidor de la estación puede incluir un receptor de comunicaciones y el vehículo puede incorporar un transmisor de comunicaciones (por ejemplo, SAE J2799). El sistema de comunicación de la Asociación de Datos por Infrarrojos

⁹ Breakaway: Separador. Dispenser: surtidor. Dispenser controller: controlador del surtidor. Temperature+pressure sensors: Sensores de temperatura y presión. Meter: medidor. Ambient temperature sensor: sensor de la temperatura ambiente. Cooling block: bloque de refrigeración. Hose: manguera. Nozzle+communication: boquilla+comunicación. Fuel line: línea de combustible. Grounded and bonded fueling pad: plataforma de repostaje conectada a tierra y protegida. Vehicle fueling receptacle: receptáculo de repostaje del vehículo. Thermally activated pressure relief device (TPRD): dispositivo de alivio de presión activado térmicamente (TPRD). Temperature and pressure sensors: sensores de temperatura y presión.. Compressed Hydrogen Storage System (CHSS): sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido (CHSS).

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

en Vehículos (IrDA) podrá utilizar el protocolo SAE J2799 para transmitir la temperatura y la presión medidas del sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido en el vehículo al surtidor de hidrógeno. El sistema de control del sistema de dispensación podrá utilizar estos datos para que el sistema de control gestione el proceso de repostaje.

A fin de alcanzar la Presión Operativa Máxima (MOP) necesaria para alimentar el CHSS del vehículo de hidrógeno en toda la gama de condiciones de funcionamiento, en la Tabla 2 se indican los índices de presión mínima recomendada de los componentes necesarios para el sistema de dispensación de hidrógeno en relación con el Nivel de Servicio de Hidrógeno (HSL) del surtidor, la clase de presión (definida en la norma ISO 17268) y la Presión Operativa Máxima Admisible (MAWP) del sistema de dispensación.

Tabla 2 Niveles de presión del sistema de dispensación y valores mínimos de presión recomendados para los componentes

Nivel de servicio de hidrógeno (NSH)	Clase de presión	Presión operativa máxima (MOP)	Presión operativa máxima admisible del sistema de distribución (MAWP)
Igual a la NWP del vehículo aprovisionado		$1,25 \times \text{HSL}$ Presión máxima durante el repostaje normal	$1,375 \times \text{HSL}$ Punto de ajuste más alto permitido para la protección de la presión del sistema de distribución
250 MPa	H250	312,5 MPa	343,75 MPa
350 MPa	H350	437,5 MPa	481,25 MPa
500 MPa	H500	625 MPa	687,5 MPa
700 MPa	H700	875 MPa	962,5 MPa

En caso de utilizar componentes que estén por debajo de la presión nominal de la Tabla 2, la presión máxima de trabajo del sistema de dispensación se reducirá en función del componente con la presión nominal más baja. El sistema de dispensación también estará protegido contra la sobrepresurización.

Además del índice de presión, los componentes del sistema de suministro de hidrógeno deberán cumplir los siguientes requisitos:

- un rango de temperatura ambiente de -40 °C a $+50\text{ °C}$, a menos que las condiciones locales permitan o requieran otros límites de temperatura;
- compatibilidad de los materiales que normalmente están en contacto con hidrógeno;
- una vida útil especificada antes del mantenimiento o la sustitución.

El objetivo de la vida útil debería ser de 100.000 ciclos para el conjunto de abastecimiento de combustible, pero, tanto si se cumple este objetivo como si no, la vida útil debería definirse e indicarse para evitar fallos en las actividades de mantenimiento planificadas.

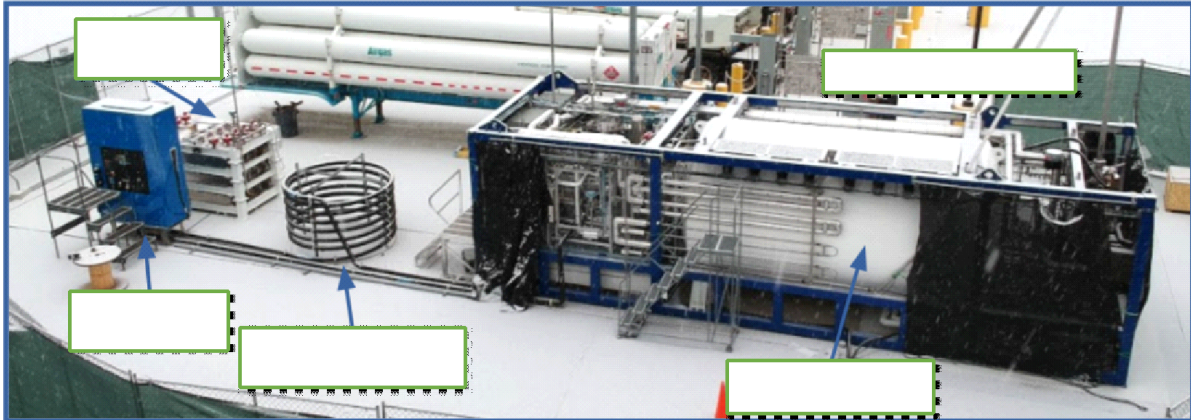
Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

Los componentes del sistema de dispensación de hidrógeno a alta presión solo se marcarán con la clase de presión si están diseñados y verificados para cumplir o superar los requisitos de presión, temperatura, compatibilidad de materiales y vida útil definidos anteriormente. Los componentes de alta presión se deben montar cumpliendo estrictamente las instrucciones del proveedor y siguiendo un procedimiento de montaje correcto. El fabricante garantizará que la caída de presión entre el sensor de presión del combustible del surtidor que supervisa la presión del vehículo y la boquilla no supere el valor definido en el protocolo de repostaje durante el flujo de hidrógeno hacia el vehículo.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

3.5 Estación de servicio basada en almacenamiento de hidrógeno líquido – Equipamiento

La LHRS suele estar integrada con el almacenamiento de HL₂, y consta de un patín de LHRS, un depósito de HL₂, líneas de interconexión, un surtidor de hidrógeno y un dispositivo de prueba como partes principales (véase Figura 11).



10

Figura 11 Resumen de las partes principales de un tipo de LHRS con almacenamiento de HL₂ integrado.

El diagrama general del proceso de la estación de repostaje de hidrógeno líquido se presenta en Figura 12.

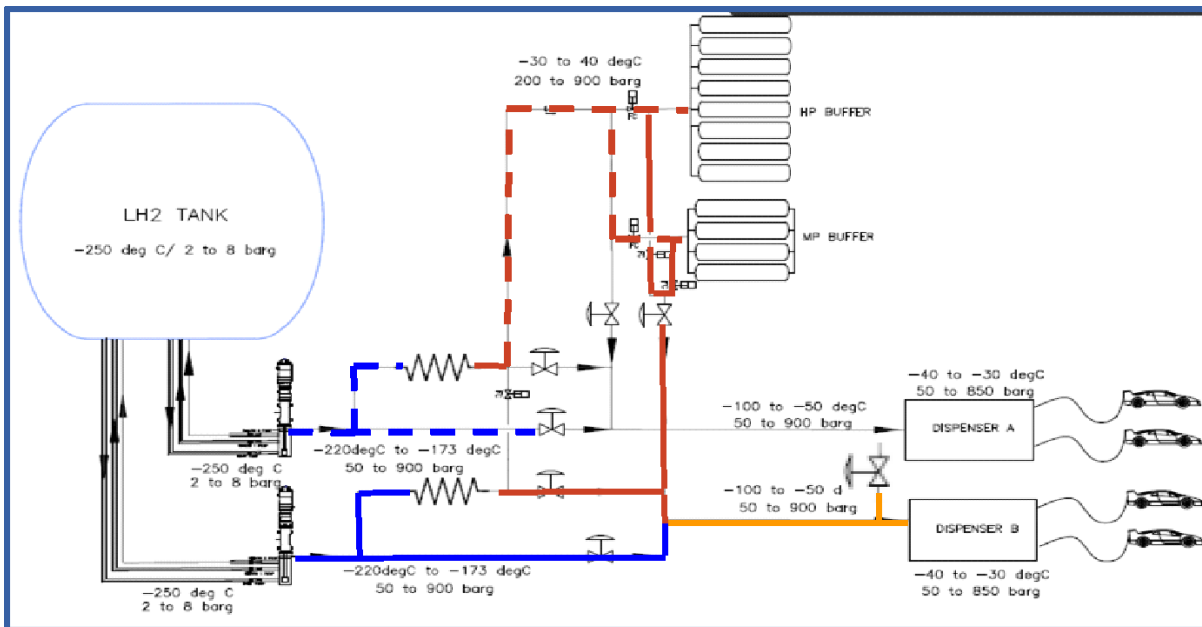


Figura 12. Flujo de proceso de una estación de repostaje de HL₂.

¹⁰ Test device: dispositivo de prueba. Hydrogen dispenser: surtidor de hidrógeno. Interconnecting lines: líneas de interconexión. Tank: depósito. Skid: patín.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

El principal equipamiento de la LHRS consta de:

- el depósito de HL_2 ,
- la bomba criogénica,
- el vaporizador,
- el panel de válvulas,
- los depósitos intermedios,
- la conexión con el surtidor,
- el surtidor.

En la siguiente imagen se muestra un tipo de patín principal de LHRS con la identificación de los principales equipos funcionales:

- en Figura 13, para el lado “criogénico”,
- en Figura 14, para el lado “caliente”.

Los equipos y sus funcionalidades se describirán con más detalle en los siguientes subapartados.



Figura 13. Visión general del patín LHRS - lado "criogénico".

¹¹ Thermo-convector: calefactor. Tank: tanque. Vaporizer: vaporizador. Heat exchanger: intercambiador de calor. Vehicle crash protection: protección contra choques del vehículo. Vacuum jacketed lines: líneas con camisa de vacío. Trailer offloading: descarga del remolque. Vacuum jacketed sump: sumidero con camisa de vacío.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno



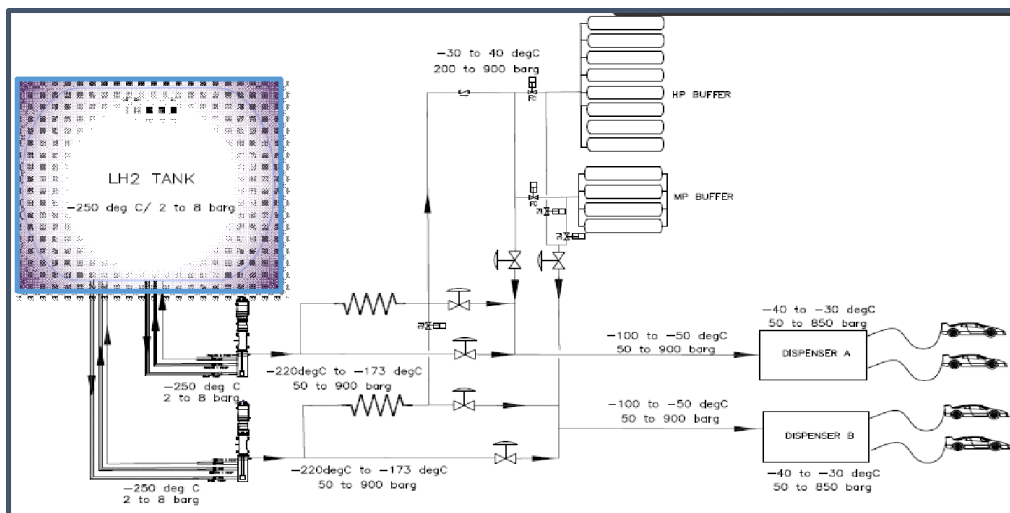
12

Figura 14. Visión general del patín LHRH - lado "caliente".

3.5.1 Almacenamiento de hidrógeno líquido

Respecto a las LHRH, el depósito de hidrógeno líquido se puede integrar dentro de un patín tal y como se representa en este documento y como se muestra en las LHRH Linde en Oakland. No obstante, el almacenamiento de HL_2 puede ser un recipiente autónomo, dispuesto vertical u horizontalmente.

Para LHRH como se muestra en la Figura 15, el volumen de almacenamiento de HL_2 es de unos 20 m^3 y proporciona una capacidad de 1 t de H_2 . La temperatura de almacenamiento es de unos -250°C , y la presión de almacenamiento es de 2 a 8 bares.



¹² Thermal fluid pumps for vaporizer system: bombas de fluido térmico para sistema de vaporización. Buffer crash protection: amortiguador protector contra colisiones. Main valve panel: panel de la válvula principal. Human-machine interface: interfaz hombre-máquina. Electrical panel: panel eléctrico. Buffers: depósitos. Tank: depósito.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

Figura 15. Flujo del proceso de una estación de repostaje de HL_2 - Tanque de almacenamiento de HL_2

Los principales parámetros de esta parte de la LHRS son:

- El aislamiento elegido es un Aislamiento Multicapa (MLI) con vacío para mantener la temperatura criogénica (véase Figura 16),
- El depósito es horizontal para integrarlo dentro de un patín y adaptarse a los requisitos de autorización (otras configuraciones son posibles, con un depósito independiente de mayor capacidad, por ejemplo),
- Todas las interfaces están en un lado del depósito,
 - o Líneas de alimentación y retorno para cada bomba (+ una tercera para controlar el nivel en el sumidero de la bomba HL_2)
 - o Modo convencional o modo termosifón
 - o Líneas de seguridad y ventilación
 - o Líneas de llenado (inferior y superior)
- La protección contra choques está integrada en el bastidor (véase Figura 17).



Figura 16 Aislamiento MLI.



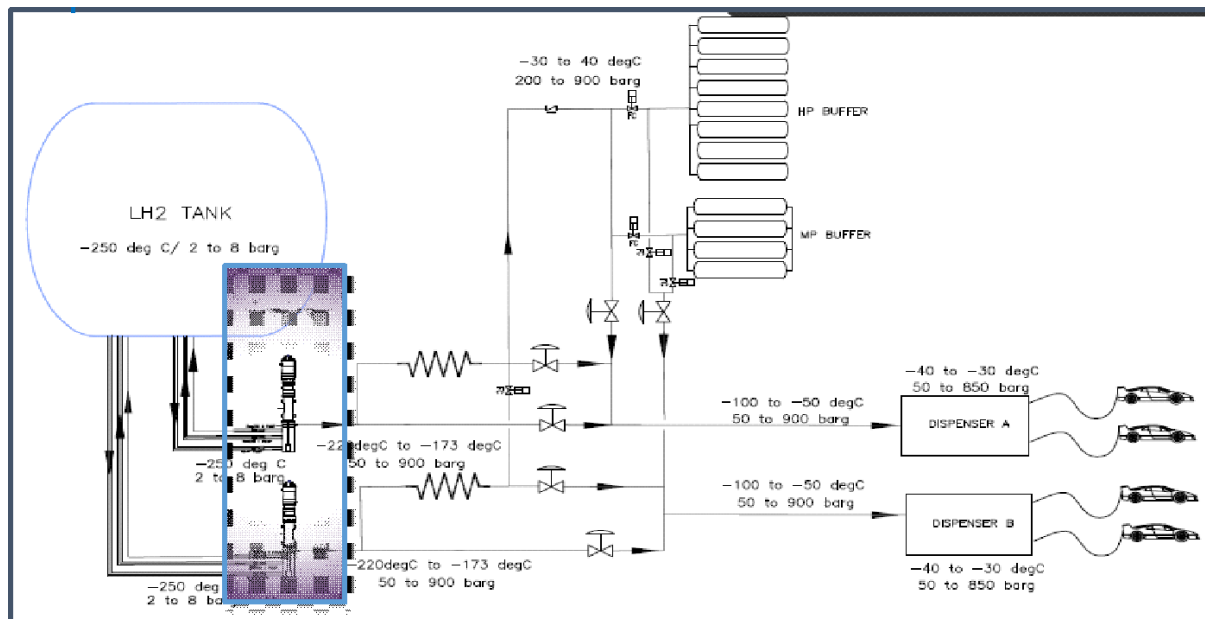
Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

Figura 17 Protección contra choques (en azul) en la parte inferior.

El depósito de HL_2 es abastecido por un camión de HL_2 . Este camión de HL_2 está compuesto por un depósito horizontal de 40 m³ que funciona a entre 1 y 12 bares (inventario: 4 t- H_2). La conexión entre el depósito y el camión se realiza mediante una línea de transferencia flexible. La transferencia se realiza sin bomba. Un pequeño vaporizador en el remolque producirá un aumento de presión en el tanque del camión y permitirá la transferencia de hidrógeno líquido en el depósito vertical fijo.

3.5.2 Bomba criogénica

Las bombas criogénicas instaladas en LHRS se muestran en la Figura 18.



13

Figura 18 Flujo de procesos de una estación de repostaje de HL_2 - Bomba de HL_2 .

La bomba criogénica, como se muestra en la Figura 19, permite transferir el líquido del depósito de almacenamiento al intercambiador de calor. La presión del hidrógeno líquido aumenta ligeramente entre el depósito y el intercambiador de calor.

¹³ Pump: bomba. Dispenser: surtidor. Buffer: depósito.



Figura 19 Bomba criogénica.

La bomba está sumergida en un depósito con revestimiento de vacío como se ilustra en Figura 20.

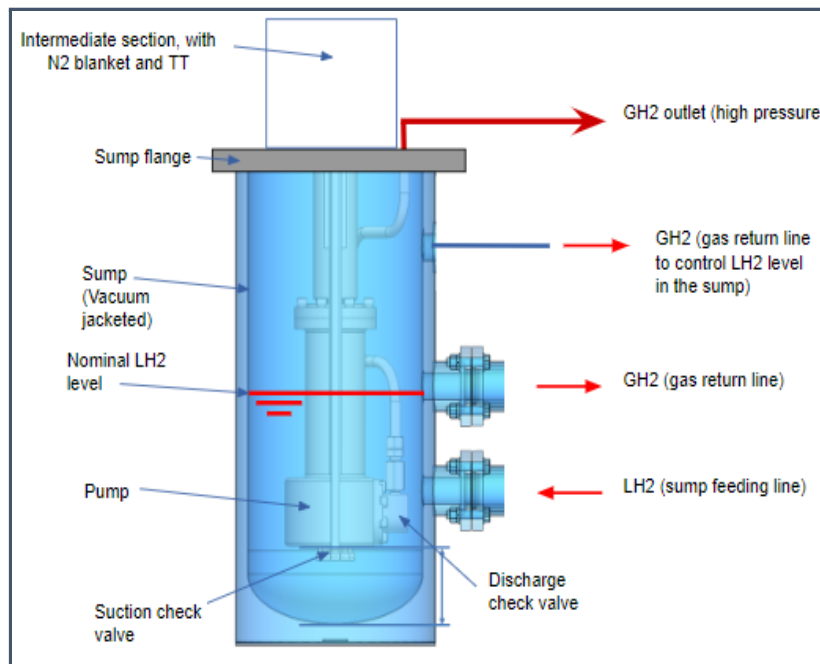
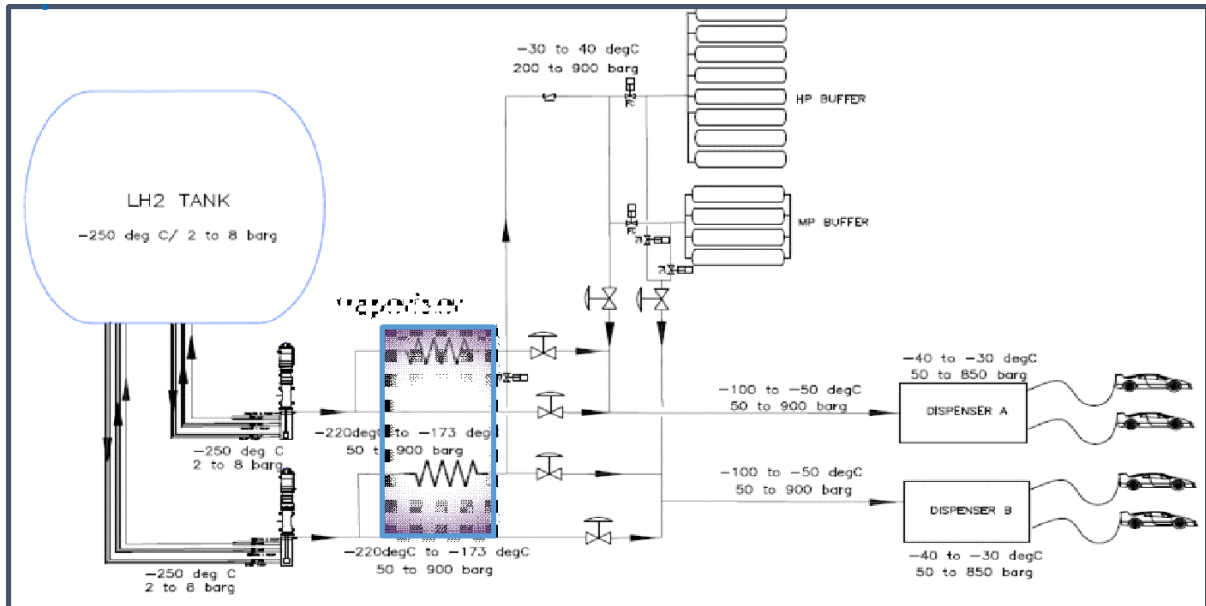


Figura 20. Bomba en un depósito con **revestimiento/camisa/encapsulamiento de vacío**.

3.5.3 Vaporizador de LH₂

El vaporizador en la LHRS se muestra en la Figura 21.



14

Figura 21 Flujo del proceso de una estación de repostaje de LH₂ - Vaporizador.

El objetivo del vaporizador es aumentar la presión del hidrógeno gaseoso que se almacenará en los depósitos intermedios a una presión de hasta 900 bar. La temperatura del hidrógeno también aumentará de -220 a -30°C.

Hay varias tecnologías disponibles para este intercambiador de calor. Las principales son:

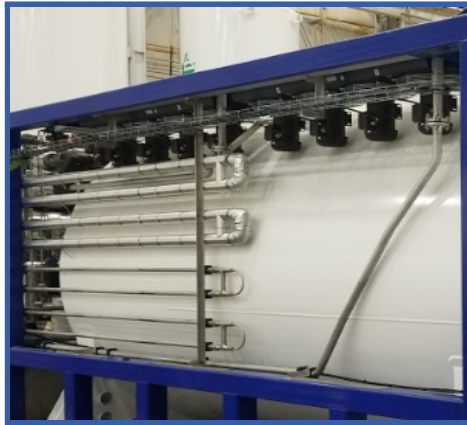
- vaporizador atmosférico,
- y vaporizador **tubo en tubo (tube-in-tube)**.

El vaporizador de **tubo en tubo**, como se muestra en la Figura 22, es el preferido para las estaciones de servicio por las razones que se exponen a continuación:

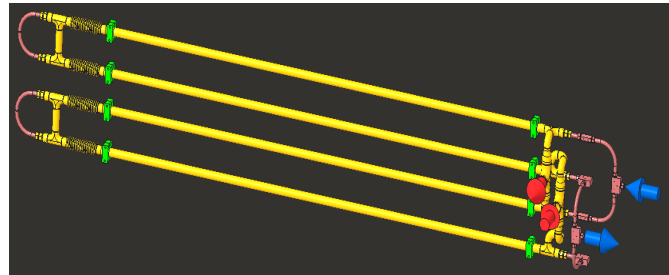
- sencillo y fácil de fabricar,
- solución compacta comparada con el vaporizador atmosférico,
- no se crea zona de O₂ enriquecido,
- bajo consumo de energía comparado con el calentador eléctrico (8 veces menos).

¹⁴ Tank: depósito. Vaporizer: vaporizador. Buffer: depósito. Dispenser: surtidor.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno



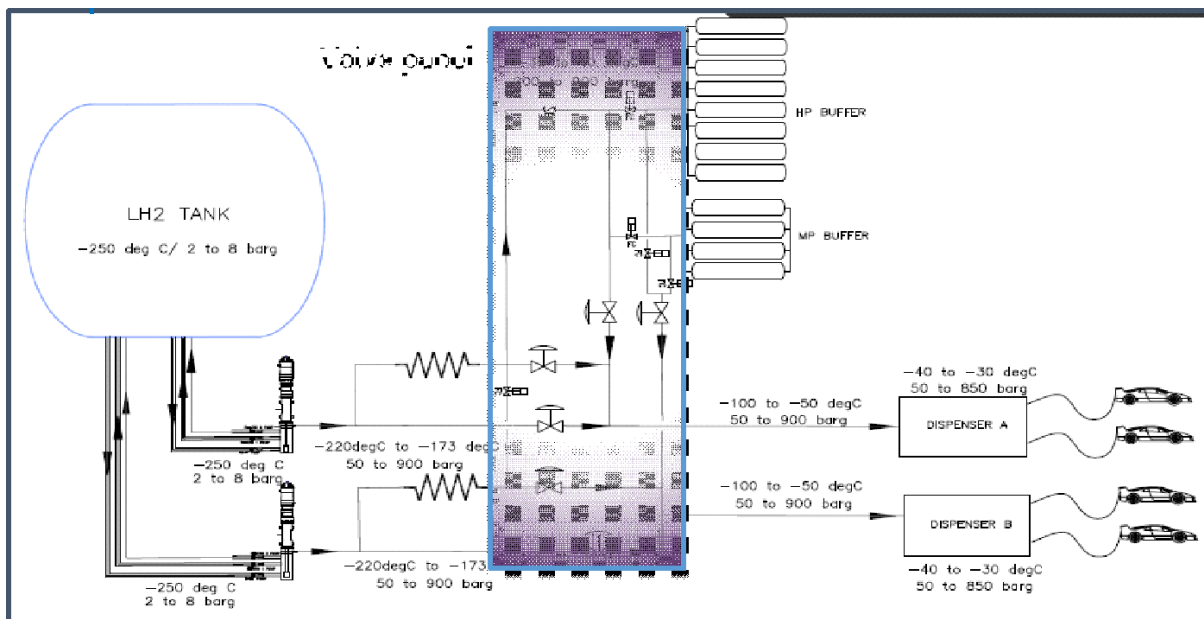
(A)



(B)

Figura 22 (A) Intercambiador de calor de **tubo en tubo** montado en el patín LHRs, (B) Principio de vaporización del HL_2 (flechas azules).

3.5.4 Panel de válvulas



15

Figura 23 Flujo de proceso de una estación de servicio basada en HL_2 - Panel de válvulas.

El panel de válvulas instalado en LHRs se muestra en la Figura 23.

Se incluye una vista del panel de válvulas en Figura 24. Esta parte del proceso es bastante sencilla, pero es una fuente potencial de fugas de hidrógeno gaseoso por el alto número de conexiones para válvulas, transmisores de presión y otros equipos necesarios para el

¹⁵Valve panel: panel de válvulas. Tank: depósito. Buffer: depósito. Dispenser: surtidor.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

funcionamiento de la estación. Las bombas criogénicas instaladas en la LHRS se muestran en la Figura 23.

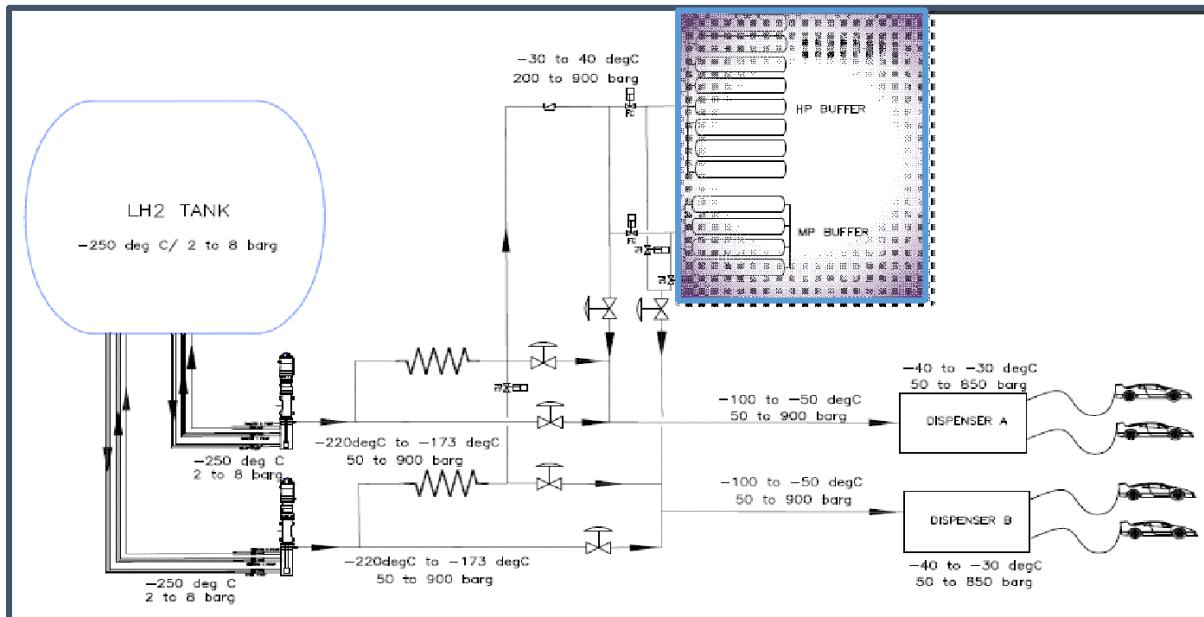


Figura 24. Panel de válvulas.

En esta fase, el hidrógeno es gaseoso, y la presión máxima alcanza los 900 bar.

3.5.5 Depósitos intermedios gaseosos

Los depósitos intermedios gaseosos instalados en LHRS se muestran en la Figura 25.



16

Figura 25 Flujo del proceso de una estación de servicio de HL2 - Depósito intermedio gaseoso.

La Presión Operativa Máxima Admisible (MAWP) de los depósitos intermedios es de 1000 bar (100 MPa). Se utilizan cilindros de tipo II en acero y **empaquetados/envueltos** en carbono para mejorar la resistencia mecánica de los cilindros. En la configuración de la estación presentada, los cilindros seleccionados tienen un volumen de 123 L. Cada grupo de 4 cilindros está unido para formar 3 paquetes, como se muestra en Figura 26, integrados en el bastidor principal.

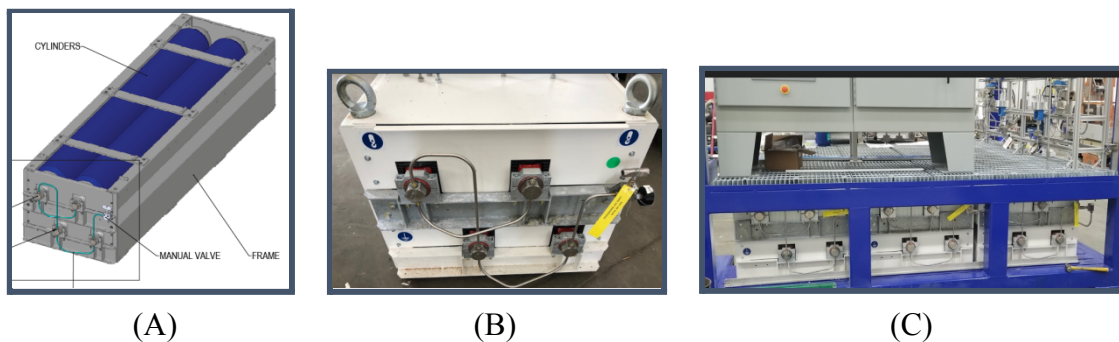


Figura 26. Depósitos intermedios de alta presión. (A) 4 depósitos intermedios de tipo II en un haz, (B) Interconexiones en los cabezales de los depósitos intermedios, (C) Integración de los grupos en el patín LHRS.

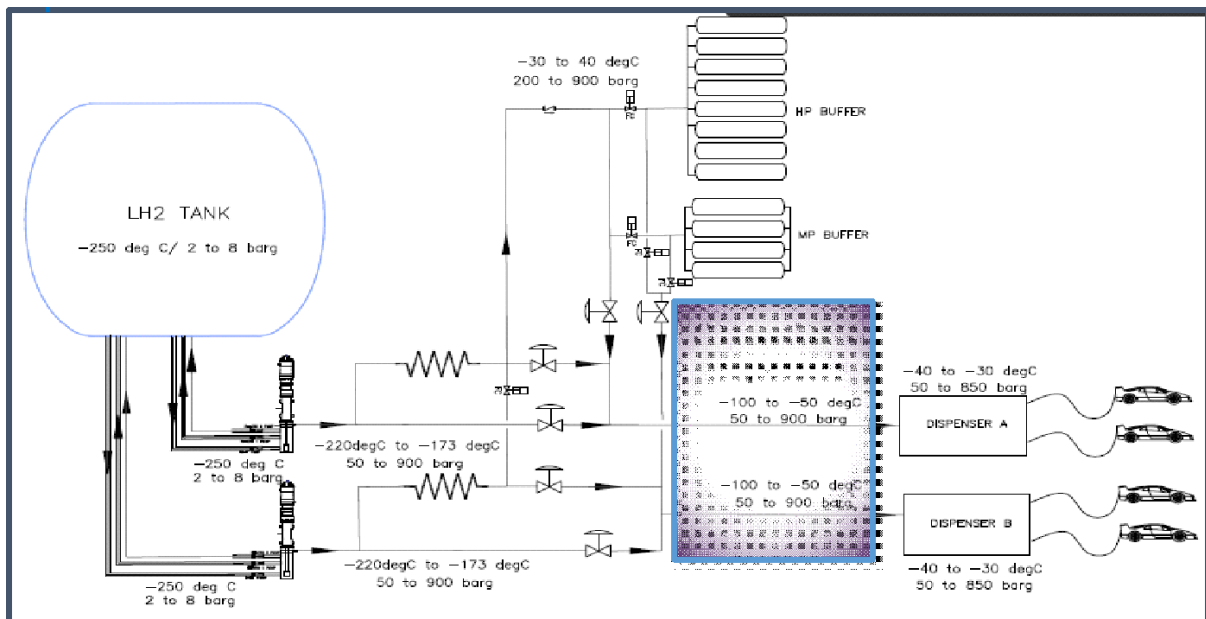
Cada grupo tiene un peso de 3 t. Los depósitos intermedios están protegidos contra el fuego gracias a un aislamiento específico.

¹⁶ Tank: depósito. Buffers: depósitos. Dispenser: surtidor.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

3.5.6 Conexión al surtidor

La conexión con el surtidor en la LHRS se muestra en la Figura 27.



17

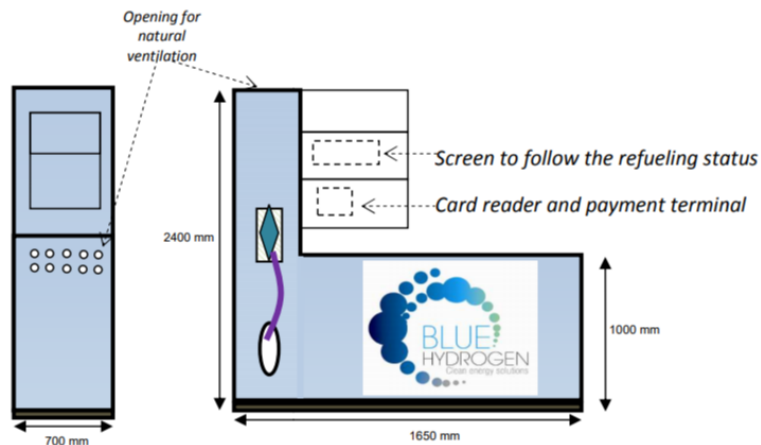
Figura 27 Flujo de proceso de una estación de repostaje de HL₂ - Conexión a los surtidores.

Las líneas pueden tener una longitud superior a 60 m. Cabe mantenerlos fríos para realizar el repostaje con éxito. Para hacer frente al calentamiento, se encontró una solución **mixta/cruzada** y se establecieron procesos específicos de llenado inteligente en función de las variaciones de la carga en la estación durante el día.

¹⁷ Tank: depósito. Connection to dispensers: unión con los surtidores. Buffer: depósito. Opening for natural ventilation: apertura para ventilación natural. Screen to follow the refueling status: pantalla para hacer el seguimiento del repostaje. Card reader and payment terminal: Lector de tarjetas y terminal de pago.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

3.5.7 Surtidor



(A)

(B)

Figura 28 (A) Elementos principales del surtidor y dimensiones indicativas, (B) patín de válvulas.

El surtidor permite una conexión rápida, fácil y segura entre la estación y el vehículo para realizar el repostaje. La configuración de un surtidor tipo se muestra en la Figura 28.

El surtidor está formado por subconjuntos:

- Distribución: Mástil y panel de válvulas con válvula de llenado automático, boquilla y freno/seccionador.
- Control: HMI - Control automático de llenado - Cuadro eléctrico - Control de acceso.

Como se muestra en la Figura 29, entre todas las características técnicas del surtidor, cabe destacar las siguientes:

- El llenado es automático y requiere mínimas manipulaciones por el cliente (boquilla + pulsador de arranque),
- El conector o boquilla del vehículo será fácil de utilizar y estará homologado según la norma SAE J2600,
- Una racor seccionador garantiza una interrupción mecánica del repostaje en caso de que el vehículo se aleje del surtidor sin retirar la boquilla,
- Boquilla IR (conforme a la norma SAE J2799) para línea de 700 bares.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno



(A)

(B)

Figura 29 (A) Vista de surtidor dual, (B) tobera para repostaje.

Con el surtidor doble, la estación es capaz de dispensar hidrógeno a dos posiciones de repostaje de vehículos ligeros (2-10 kg).

Las presiones de suministro según el tipo de surtidor son:

- 350 bar para coche con extensor de autonomía,
- 700 bar para coche de pila de combustible,
- 350 bar para autobuses y camiones.

Los caudales máximos son:

- 60 g.s-1 para repostaje de coches,
- y 120 g.s-1 para repostaje de autobuses y camiones, 350 bar.

La temperatura de suministro es de -30°C a $+40^{\circ}\text{C}$ (protocolo de repostaje: SAE J2601 H70 T40).

En cuanto medidas de seguridad, muy cerca del surtidor o dentro de él:

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

- Detector de H₂ dentro del surtidor:
- Ventilación natural del surtidor,
- Detector de llama cerca del surtidor,
- Botones de parada de emergencia.

4. Producción

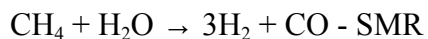
4.1 Reformado de metano con vapor

El proceso de Reformado de Metano con Vapor (SMR) utiliza vapor y un catalizador para generar hidrógeno a partir de un hidrocarburo ligero, por ejemplo metano o propano (véase Figura 30 y Figura 31). El proceso básicamente extrae el hidrógeno del hidrocarburo y del agua necesaria para convertir todo el carbono y el oxígeno resultantes en CO₂.

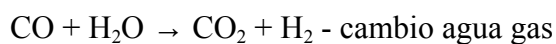


Figura 30 Planta SMR Air Liquide.

Los dos pasos principales de la conversión son:



- Reacción endotérmica: $\Delta H^\circ = + 206 \text{ kJ.mol}^{-1}$
- Reacción catalítica: Ni/Al₂O₃
- 20 - 30 bar, 900 – 1000°C, pocos minutos



- Reacción ligeramente exotérmica
- Reacción catalítica: CuO ; Fe₂O₃; Cr₂O₃

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

- 20 - 30 bares, 400°C (alta temperatura) / 200°C (baja temperatura)

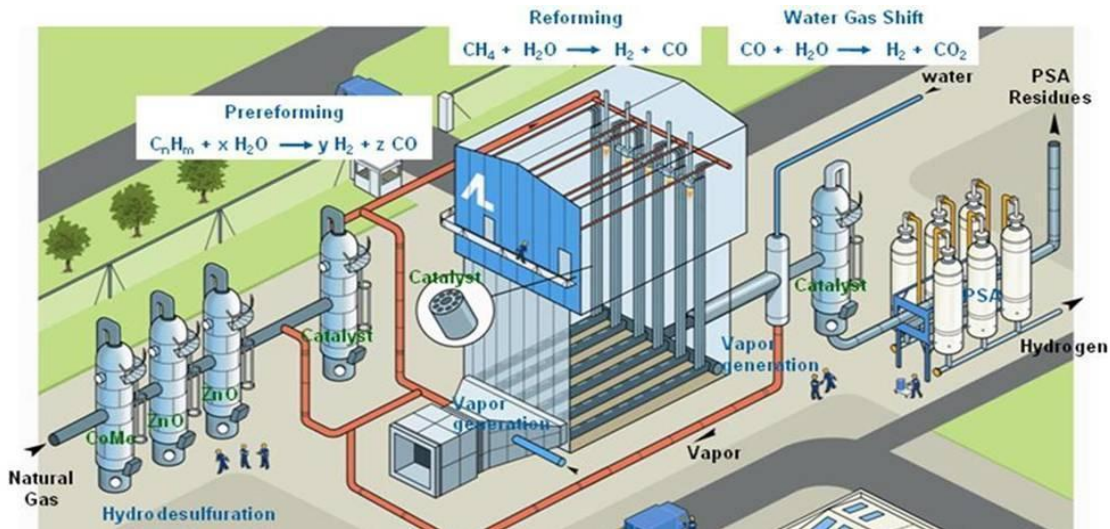


Figura 31 Esquema de una planta de reformado de metano con vapor.

4.2 Electrolizador

La electrólisis del agua consiste en dividir las moléculas de agua en sus partes constituyentes (H₂ y O₂) mediante el paso de una corriente eléctrica (véase Figura 32).

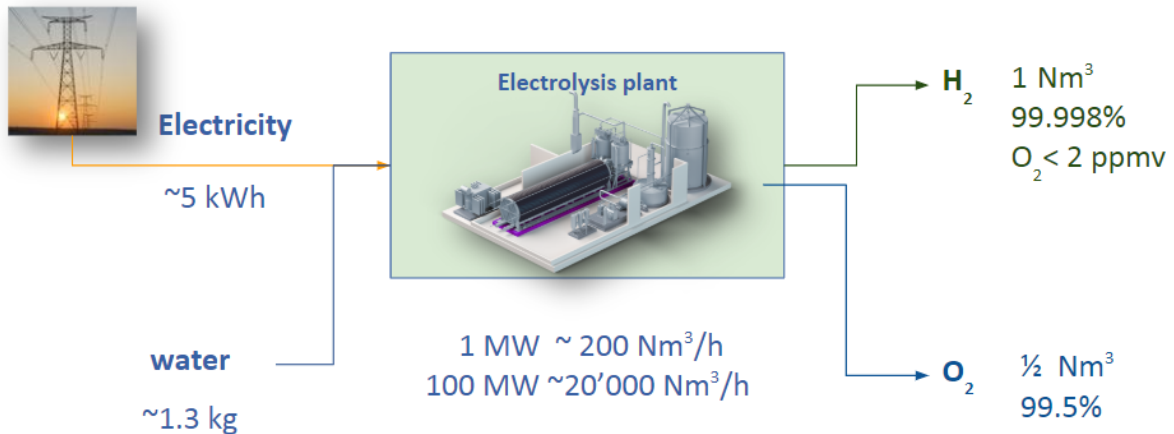


Figura 32 Principio del proceso de electrólisis.

La Figura 33 presenta el siguiente esquema del proceso. El agua se divide aplicando electricidad para generar hidrógeno y oxígeno. La pureza del hidrógeno generado es extremadamente alta.

¹⁸ Prereforming: prereformado. Reforming: reformado. Water gas shift: cambio agua a gas. Natural gas: gas natural. Hydrodesulfuration: hidrosulfuración. Catalyst: catalizador. Vapor generation: generación de vapor. Hydrogen: hidrógeno. Residues: residuos. Water: agua. Electrolyzer: electrolizador.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno



19

Figura 33 Sistema de electrólisis.

Existen varias tecnologías de electrólisis con diferentes niveles de madurez (también denominados nivel de preparación tecnológica (TRL)):

- Electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM) – TRL 8
- Electrolizador alcalino – TRL 9
- Electrolizador de óxido sólido – TRL 6

Pero las principales tecnologías de electrolizadores son las alcalinas, que contienen electrolitos líquidos (hidróxido de potasio o de sodio), y las de electrolitos poliméricos sólidos, por ejemplo, los electrolizadores PEM. Las principales reacciones de los distintos electrolizadores se señalan en la Figura 34.

	Proton Exchange Membrane	Alkaline Electrolysis	Solid Oxide Electrolysis
Cathode	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$
Anode	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$2\text{HO}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$
	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$

Figura 34 Principales reacciones según las tecnologías de electrólisis.

Las principales diferencias entre estas tecnologías son:

¹⁹ Electricity: electricidad. Electrolysis plant: planta de electrólisis. Water: agua. Cathode: cátodo. Anode: ánodo. Proton exchange membrane: membrana de intercambio de protones. Alkaline electrolysis: electrólisis alcalina. Solid oxide electrolysis: electrólisis de óxido sólido.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

- El separador: diafragma o membrana.
- El electrolito: líquido, sólido, ácido o base.

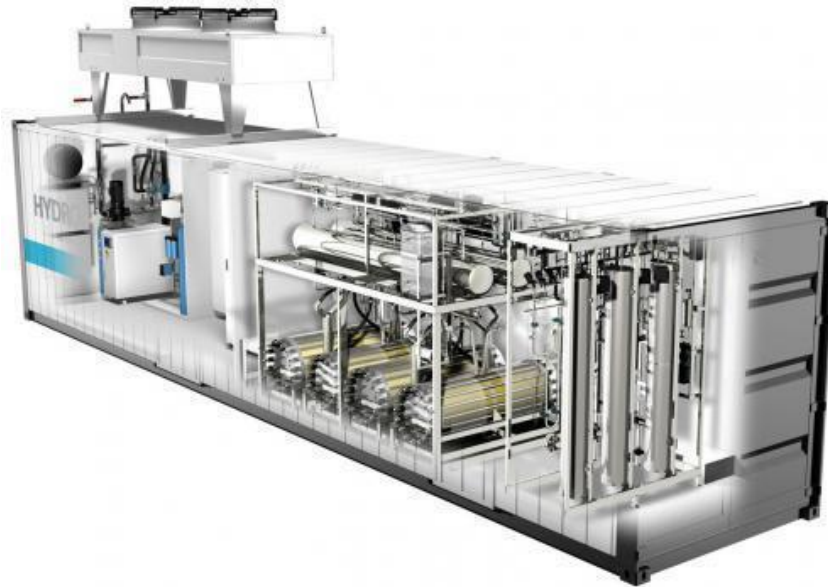


Figura 35 Esquema del patín electrolizador de Hydrogenics.

Además de la unidad electrolizadora, una estación in situ que genere hidrógeno por electrólisis requiere sistemas de purificación de agua y una unidad de purificación y secado de hidrógeno para tratar el hidrógeno producido. Muchos electrolizadores generan hidrógeno a una presión relativamente baja, por ejemplo, de 10 a 25 bar, por lo que se requiere una compresión adicional para elevar la presión hasta presiones de almacenamiento.

4.3 Licuefactor

La licuefacción del H_2 es un proceso que requiere mucha energía. El **trabajo mínimo requerido** para la licuefacción del hidrógeno (en equilibrio orto-para) es de 3,92 kWh de electricidad /kg de H_2 o 0,12 kWh /kWh de H_2 . Sin embargo, los valores típicos para todo el proceso se sitúan en el rango de 8 a 14 kWh/kg para unidades de licuefacción relativamente grandes. La reducción del consumo energético de los licuefactores es un tema en desarrollo por la industria del HL_2 (véase el proyecto IDEALH y FCH JU, por ejemplo (<https://www.idealhy.eu/>)).

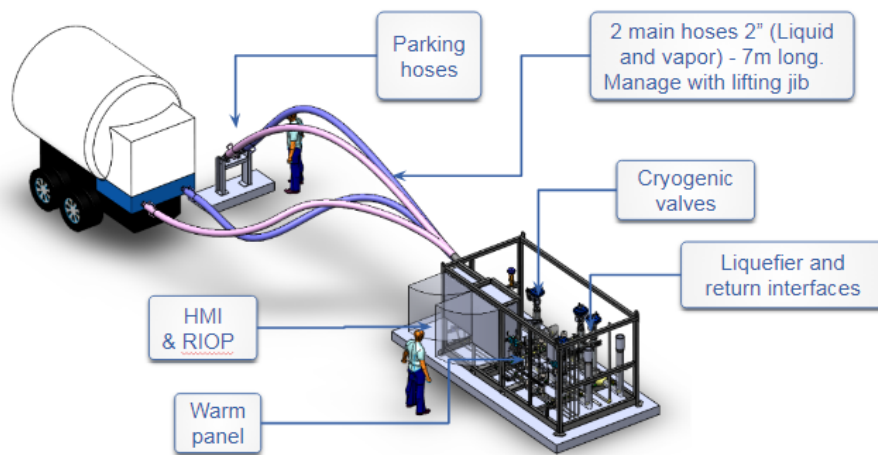
La mayoría de plantas (11) se encuentran en Norteamérica. En Europa, las plantas (3) en Francia (véase Figura 36), Holanda y Alemania funcionan con una capacidad total de 19 t.día⁻¹. Actualmente la planta de mayor tamaño es de 68 t/d (Nueva Orleans, EE.UU.). El último licuefactor puesto en marcha (2017) (10 t.día⁻¹) es propiedad de Airgas (ahora Air Liquide) en Calvert City.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno



Figura 36 Estaciones de llenado de HL₂ de Air Liquide

(izquierda: Little Town, EE.UU.; derecha: Becancour, Canadá).



20

Figura 37 Ergonomía de un muelle de carga genérico para el llenado de remolques de HL₂.

La Figura 37 muestra la ergonomía del llenado de remolques de HL₂. Para transferir HL₂ de un depósito a otro (por ejemplo, de un gran depósito a un camión o de un remolque a un depósito en su emplazamiento), existen dos métodos:

- aumento de la presión (aumento natural de la presión o vaporización voluntaria del HL₂ a través de un pequeño intercambiador de calor externo). De este modo, la presión en el "depósito madre" es mayor que la presión en el "depósito hija" y la transferencia de HL₂ es fácil. Los principales inconvenientes de este método son el prolongado tiempo de funcionamiento y el aumento de la presión del almacenamiento "madre", por lo que en ocasiones es necesaria una purga de presión;

²⁰ Parking hoses: mangueras del aparcamiento. Main hoses: mangueras principales. Long: de longitud. Manage with lifting jib: manejadas con grua. Cryogenic valves: válvulas criogénicas. Warm panel: panel caliente. Liquefier and return interfaces: interfaz del licuefactor y retorno.

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

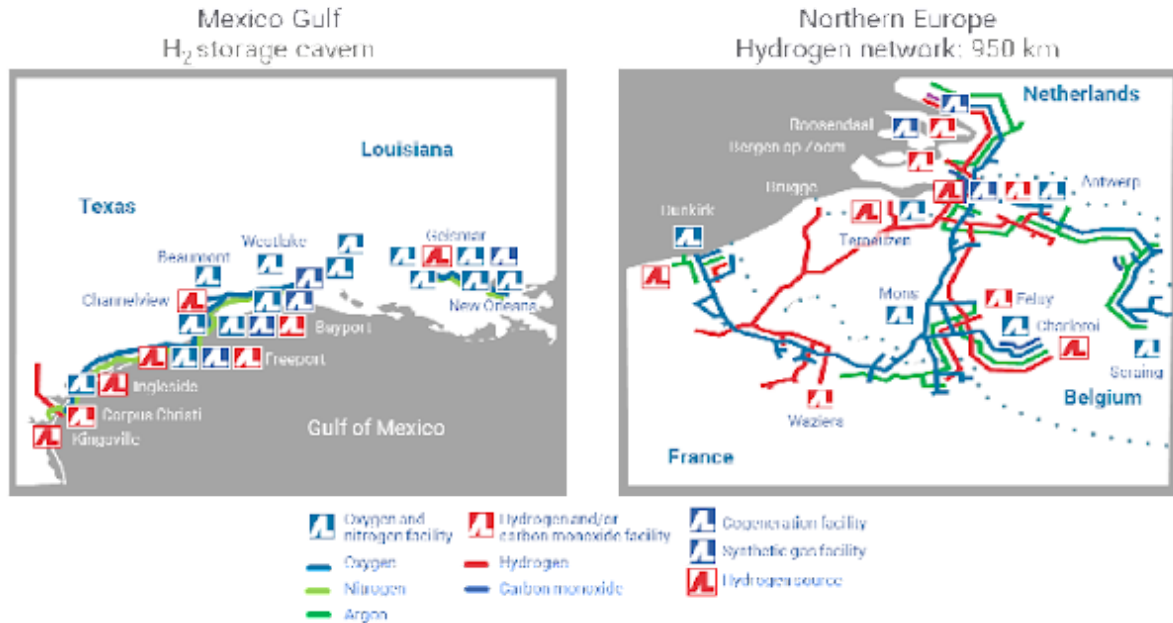
- bombeo en el "depósito madre" mediante una bomba criogénica centrífuga de transferencia **adecuada**. Los principales inconvenientes de este método son el coste de la bomba y la necesidad de un mantenimiento frecuente de la misma, sobre todo debido a la cavitación (baja NPSH disponible - **Cabeza de succión positiva neta**: diferencia entre la presión del líquido y la presión de vapor de saturación del compuesto considerado - a causa de la baja densidad del HL_2).



Figura 38 Remolque de HL_2 durante la transferencia.

²¹ Transfer flexible: flexible de transferencia. Degassing flexible: flexible de desgasificación.

5. Conductos



22

Figura 39. Fuentes y red de hidrógeno de Air Liquide:

Las tuberías se utilizan para transportar compuestos gaseosos en grandes cantidades. Según las propiedades del gas transportado y los requisitos de los clientes, la presión en las tuberías puede variar. En el caso del transporte de hidrógeno, la presión dentro de las tuberías puede alcanzar los 100 bar. La Figura 39 muestra la red de gasoductos y las plantas de producción de hidrógeno, gas de síntesis y otros gases de Air Liquide en Estados Unidos y el norte de Europa.

Como se ilustra en la Figura 39, estas tuberías están instaladas relativamente cerca de las plantas de producción. En la red de tuberías, según la distancia entre la planta de producción y el cliente, pueden hacer falta estaciones de presurización para mantener la presión prevista en la tubería. Conviene señalar que muy pocas estaciones están conectadas directamente por tuberías. Los remolques son el principal medio. Para algunos casos, puede ser interesante la producción in situ.

²² Mexico gulf: golfo de México. Storage cavern: caverna de almacenamiento. Northern Europe: Europa del norte. Hydrogen network: red de hidrógeno. Oxigen: oxígeno. Nitrogen: nitrógeno. Argon: Argón. Facility: instalación. And: y. And/or: y/o. Carbon monoxide: monóxido de carbono. Hydrogen: hidrógeno. Cogeneration: generación combinada. Synthetic gas: gas sintético. Source: fuente.

6. Características de seguridad en HRS y otras infraestructuras

(qué/dónde/para qué/funcionamiento normal y anormal (emergencia)/qué hacer-qué evitar durante la intervención)

Tabla 3. Características de seguridad del electrolizador.

Qué	Dónde	Para qué
Monitorización del proceso (presión, temperatura)	General	Detectar fuga y disfunción
Equipo con homologación ATEX	En el patín, que es un espacio cerrado donde pueden producirse fugas	Evitar fuentes de ignición
Detección de H ₂	Dentro del patín	Activar la advertencia, y las válvulas de cierre si es necesario en caso de fuga accidental
Detector de llama (UV/IR)	Fuera del patín	Activar la advertencia y, si es necesario, las válvulas de cierre en caso de escape accidental encendido

Tabla 4. Características de seguridad para remolque de hidrógeno gaseoso.

Qué	Dónde	Para qué
Válvulas de aislamiento	Cilindros	Según ADR, durante el transporte todos los almacenes están aislados por una válvula
TPRD	Sobre todo en remolques con cilindros tipo IV Situados en el techo del remolque, con orientación ascendente	Evitar la presurización y la explosión del cilindro en caso de incendio NB: no es obligatorio, pero se instala en algunos remolques de gran capacidad con botellas de tipo IV
Prueba de estanqueidad para detectar fugas	Almacenamiento del remolque	Evitar fugas importantes durante el repostaje del remolque

Tabla 5. Características de seguridad para conductos de hidrógeno a alta presión.

Qué	Dónde	Para qué
-----	-------	----------

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

Control de presión	Conducto	Detectar fugas importantes en la red
Inspección periódica	Conducto	Detectar defectos de revestimiento y evitar fugas importantes
Protección catódica	Conducto	Evitar la corrosión del conducto

Tabla 6. Características de seguridad para estaciones de repostaje de hidrógeno.

Qué	Dónde	Para qué
Manguera y accesorios homologados y validados	Proceso y surtidor	Evitar fugas accidentales
Sustitución periódica de la manguera	Surtidor	Evitar fugas accidentales
Detección de H ₂	Dentro del contenedor de proceso Dentro del surtidor	Activar aviso, y cerrar válvulas si es preciso en caso de fuga accidental
Detector de llama (UV/IR)	Dentro del contenedor de proceso En el exterior, cerca del surtidor	Activar aviso, y cerrar válvulas si es preciso en caso de escape encendido accidental
Una válvula de cierre automática	Varias entre depósito de H ₂ y surtidor	Limitar el inventario de H ₂ en caso de escape accidental
Monitorizar la presión del proceso	General	Detectar una caída anormal de la presión debida a fuga o rotura de conducto
Espacios cerrados con ventilación natural	Contenedor de proceso Surtidor	Evitar alcanzar los límites de inflamabilidad de la mezcla H ₂ -aire en caso de escape accidental
Ventilación forzada	Contenedor de proceso para algunos modelos	Evite alcanzar los límites de inflamabilidad de la mezcla de H ₂ -aire en caso de fuga accidental si la ventilación natural no es posible o no es lo suficientemente eficaz
Equipo con homologación ATEX	En espacios cerrados donde pueden producirse fugas (por ejemplo, patines y surtidor)	Evitar fuentes de ignición
Manguera conectada a tierra	Surtidor	Evitar las chispas causadas por la electricidad estática durante el repostaje

Tema 12: Estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno

Prueba de fugas automática antes del llenado	General	Evitar fugas accidentales
Limitadores de flujo	General	Limitar el caudal en caso de escape o rotura de conducto
Tiempo de cierre automático	General	Cierre de las válvulas de alimentación de H ₂ en caso de rotura o fuga de manguera
Dispositivo de ruptura de la manguera	Surtidor	Evita una fuga importante cerrando los flexibles de alimentación en caso de rotura por olvidar desconectar el vehículo
Protección contra golpes (bolardo)	Surtidor	Proteja el surtidor de una agresión mecánica importante por marcado accidental del vehículo y evite una fuga catastrófica
Botón de parada de emergencia	A pocos metros del surtidor	Cierre de las válvulas de alimentación de H ₂ en caso de emergencia
Losa de hormigón conductora (conectada a tierra)	Surtidor	Evite las chispas causadas por la electricidad estática durante el repostaje

Tabla 7. Características de seguridad para remolques de hidrógeno líquido.

Qué	Dónde	Para qué
Dos válvulas de seguridad con al menos una neumática	Depósito	Según ADR, durante el transporte todos los almacenes están aislados por una válvula
Válvula de seguridad en carretera	Depósito	Evacuar sobrepresión
Disco de ruptura	Depósito	Evitar el estallido del depósito en caso de aumento de presión
PRD	Depósito	Limitar el riesgo de evaporación

Tabla 8. Características de seguridad para depósitos de hidrógeno líquido.

Qué	Dónde	Para qué
Control de la presión y la temperatura	Depósito	Detectar defecto de aislamiento
Monitorización de nivel	Depósito	Evitar el sobrellenado
Disco de ruptura	Depósito	Evitar el estallido del depósito en caso de aumento de presión

PRD	Depósito	Limitar el riesgo de evaporación
-----	----------	----------------------------------

Agradecimientos

Reconocemos la aportación del proyecto HyResponse, ya que los materiales aquí presentados se basan en las clases originales de HyResponse.

Referencias

1. Modelo de análisis para estación de repostaje de hidrógeno (HRSAM). Argonne National Laboratory. <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hdsam> [consultado el 26/05/2021]
2. Hidrógeno gaseoso - Estaciones de servicio. Parte 1: Requisitos generales. Publicación de Normas BSI. BS ISO 19880-1: 2020.
3. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:21855-21865.
4. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:16675-16685.
5. SAE (Society of Automotive Engineers). Protocolos de repostaje para vehículos de superficie ligeros con hidrógeno gaseoso. Norma para vehículos de superficie. J2601. Julio de 2014.
6. Elgowainy A, Reddi K, Sutherland E, Joseck F. Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:20197-20206.
7. NIST (National Institute of Standards and Technology). Thermophysical properties of fluid systems. 2016. Recuperad de: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. [consultado el 26 de mayo de 2021].