



Programa Europeo de Formación de Formadores para Equipos de Respuesta

## Tema 5

# Seguridad del hidrógeno líquido

## 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 PRESLHY.



### 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 Fuel Cell Hydrogen 2 joint undertaking (FCH2 JU) en virtud del acuerdo de subvención nº 875089. La EC 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. También se agradece la colaboración al proyecto del Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY) (acuerdo de subvención número 779613) por su informe 6.1 – Manual sobre seguridad del hidrógeno: Capítulo sobre seguridad del LH2 .

## Tema 5: Hidrógeno líquido

### Resumen

Para diversas aplicaciones de hidrógeno en las que el volumen es una cuestión vital, se necesita el hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub> Liquefied Hydrogen) para poder reducir el volumen. Sin embargo, también hay otras situaciones en las que el estado líquido representa una solución razonable y económica para el almacenamiento y la distribución de grandes cantidades de hidrógeno, según las necesidades del usuario final. Además, el LH<sub>2</sub> tiene la ventaja de ser extremadamente puro (limpio de impurezas), por lo que resulta idóneo para numerosas aplicaciones industriales. El mayor inconveniente es el enorme aporte de energía requerido para licuar el gas de hidrógeno, que tiene un impacto significativo en el precio final del LH<sub>2</sub>.

Los peligros asociados a la presencia y al funcionamiento de sistemas con LH<sub>2</sub> están sujetos a su evaluación de seguridad y de riesgos. Una parte esencial de estos análisis de secuencias de accidentes es la simulación mediante modelos de cálculo de los fenómenos físicos que se producen en relación con la liberación inadvertida de LH<sub>2</sub> al entorno. Se conoce bastante bien el comportamiento de la propagación y vaporización del volumen de material criogénico en el suelo líquido o sólido, así como la posible combustión de ese volumen criogenizado. Además, se han desarrollado y validado después, modelos informáticos de última generación, con los respectivos datos experimentales. Sin embargo, quedan dudas sin resolver que requieren mayores esfuerzos para ampliar la insuficiente base de datos experimentales.

Esta clase está basada en el informe 6.1 – Manual sobre seguridad del hidrógeno: Capítulo sobre seguridad del LH<sub>2</sub> – del proyecto Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY). La investigación experimental y teórica de las características del hidrógeno líquido, sus propiedades favorables y desfavorables, así como las enseñanzas aprendidas de los accidentes ha llevado a fijar un conjunto de códigos, normas, reglamentos y directrices, hasta alcanzar el elevado nivel de seguridad actual. Esto concierne tanto a la producción de LH<sub>2</sub> y los métodos de almacenamiento móvil o fijo, transporte y distribución de LH<sub>2</sub> como a su aplicación en la ciencia y la industria.

### Palabras clave

Hidrógeno líquido, escape criogénico, vertido accidental, combustión, tecnología de hidrógeno líquido

## Tema 5: Hidrógeno líquido

### 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. Propiedades del hidrógeno líquido	6
3.1 Propiedades físicas	6
3.2 Propiedades químicas	7
4. Peligros del hidrógeno líquido	7
4.1 Problemas fisiológicos con el hidrógeno criogénico	8
4.2 Ignición inmediata de un escape de LH <sub>2</sub> a presión	10
5. Tecnología de hidrógeno líquido	10
5.1 Proceso e infraestructuras de producción del hidrógeno líquido	10
5.2 Almacenamiento y transporte de hidrógeno líquido	10
5.2.1 Almacenamiento de hidrógeno líquido	10
5.2.2 Criostato para aplicaciones fijas	12
5.3 Estación de repostaje de hidrógeno líquido	12
5.3.1 Autobuses	16
6. Peligros del hidrógeno líquido y riesgos asociados para los intervinientes	16
Referencias	17

## Tema 5: Hidrógeno líquido

### 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

MEQ 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 uso de hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub>) en aplicaciones prácticas suscita gran interés debido a la mayor densidad energética del LH<sub>2</sub> en comparación con la del hidrógeno gaseoso comprimido (CGH<sub>2</sub> Compressed Gas Hydrogen). El LH<sub>2</sub> se suele utilizar como forma concentrada de almacenamiento de hidrógeno. Al igual que cualquier gas, su almacenamiento en forma de líquido ocupa menos espacio que en forma de gas. La densidad del LH<sub>2</sub> es de solo 70,8 kg/m<sup>3</sup> a una presión y una temperatura de ebullición estándar (1 atm, -252,85 °C). El LH<sub>2</sub> requiere tecnología de almacenamiento criogénico, como por ejemplo contenedores especiales aislados térmicamente y requiere una manipulación específica, común a todos los combustibles criogénicos, que plantea riesgos potenciales en cuanto a generación, transporte y aplicación de LH<sub>2</sub>.

Esta clase tiene como objetivo aportar, a los equipos de respuesta, conocimientos suficientes sobre los posibles peligros del LH<sub>2</sub> y ayudarles a comprender las propiedades y el comportamiento del LH<sub>2</sub>.

Al final de esta clase, los intervinientes podrán:

- Entender las propiedades, tanto físicas como químicas, del LH<sub>2</sub>;
- Conocer los peligros del hidrógeno criogénico;
- Reconocer la liberación y la combustión del hidrógeno criogénico y los peligros térmicos y de presión;
- Familiarizarse con las tecnologías de generación, almacenamiento y transporte de LH<sub>2</sub>.
- Identificar los riesgos y peligros del LH<sub>2</sub> pertinentes para los equipos de respuesta.

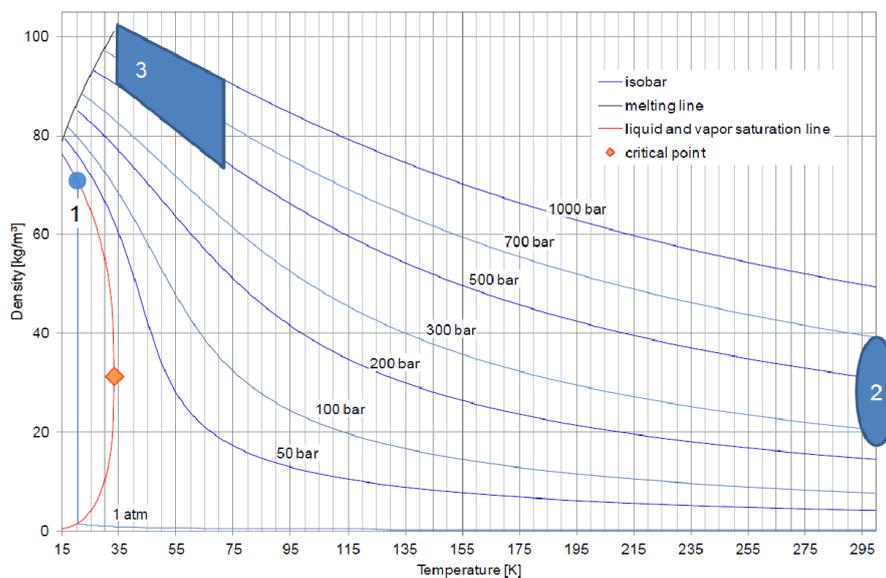
## 3. Propiedades del hidrógeno líquido

### 3.1 Propiedades físicas

El hidrógeno licuado (LH<sub>2</sub>) es el estado líquido del elemento hidrógeno. Para existir como líquido, el hidrógeno se debe enfriar por debajo de su punto crítico de -240,15 °C. Sin embargo, para que esté en estado totalmente líquido con presión atmosférica, **es necesario enfriar el hidrógeno hasta los -252,87 °C [1]**. El triple punto (es aquel en el cual coexisten en equilibrio el estado sólido, el estado líquido y el estado gaseoso de una sustancia. Se define con respecto a una temperatura y una presión de vapor) del hidrógeno es -259,34°C [1] y 0,07042 bar [2]. Además, el hidrógeno líquido posee una energía específica mucho mayor que la gasolina, el gas natural o el gasóleo. El hidrógeno líquido se suele utilizar en la forma concentrada de almacenamiento de hidrógeno. Al igual

## Tema 5: Hidrógeno líquido

que cualquier gas, su almacenamiento en forma de líquido ocupa menos espacio que en forma de gas con una temperatura y presión normales. No obstante, la densidad líquida es muy baja comparada con otros combustibles comunes. Una vez licuado, se puede mantener como líquido en contenedores presurizados y aislados térmicamente. La densidad del hidrógeno líquido es de solo 70,99 g/L (a 20 K o -253,15 °C) y tiene una densidad relativa de tan solo 0,07 (Figura 1). La densidad energética del hidrógeno líquido es muy alta; 1 kg de hidrógeno contiene aproximadamente 2,5 veces más energía que un 1 kg de gas natural. Aunque la energía específica es más del doble que la de otros combustibles, esto le confiere una densidad energética volumétrica bastante baja, muchas veces inferior. Las principales propiedades del LH<sub>2</sub> se resumen en la Tabla 1.



1 - líquido @ ~-253,15° C; 2 - gas presurizado @ ~-26,85° C; 3 - gas comprimido criogénico

Figura 1. Densidad del hidrógeno en el rango de bajas temperaturas como función de la presión [3].

### 3.2 Propiedades químicas

El hidrógeno es capaz de reaccionar químicamente con la mayoría de los elementos. En contacto con el oxígeno, el hidrógeno es altamente inflamable en una amplia gama de concentraciones. Arde con una llama caliente no luminosa liberando la energía ligada químicamente en forma de calor (calor de combustión bruto: 286 kJ/mol). Una mezcla estequiométrica de hidrógeno-aire contiene 29,5 vol% de hidrógeno. El rango de inflamabilidad es de 4–75 vol% de concentración en aire, hasta 95 vol% en oxígeno, y se amplía a medida que aumentan las temperaturas. El Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL), como cantidad mínima de combustible que soporta la combustión, suele ser el límite más importante para las fugas de baja velocidad, ya que se alcanzará rápidamente en una fuga

## Tema 5: Hidrógeno líquido

continua. Lo más destacable es que la nube con una concentración de hidrógeno superior al 4% puede cubrir distancias más largas y un área mayor desde el punto de fuga.

Una chispa débil o la descarga electrostática de un cuerpo humano, que está en el rango de 10 mJ, sería suficiente para una ignición; sin embargo, esto no es diferente de otros gases inflamables. La energía mínima de ignición disminuye aún más al aumentar la temperatura, la presión o el contenido de oxígeno. Recientemente se han realizado mediciones a temperaturas criogénicas [6].

### 4. Peligros del hidrógeno líquido

El hidrógeno líquido requiere una tecnología de almacenamiento criogénico, como por ejemplo contenedores especiales aislados térmicamente y requiere una manipulación específica común a todos los combustibles criogénicos. Esto es similar, aunque más severo, que el oxígeno líquido. Incluso con contenedores aislados térmicamente es difícil mantener una temperatura tan baja, y el hidrógeno se irá filtrando poco a poco. También comparte muchos de los problemas de seguridad con otras formas de hidrógeno, ya que a esas temperaturas también pueden licuar, o incluso solidificar, el oxígeno atmosférico, lo que puede suponer un peligro de explosión también en estas condiciones.

Para definir los distintos escenarios de peligros y consecuencias asociadas, se considera solamente el almacenamiento de LH<sub>2</sub>. En la [Tabla 1](#) se resumen estos eventos, con causas iniciales y posibles consecuencias finales.

Tabla 1. Descripción de posibles eventos peligrosos.

Eventos temidos	Condiciones principales	Consecuencias
1 - Estallido del depósito a la presión de trabajo (P <sub>w</sub> ) (fuego de impacto / fragmento)	H <sub>2</sub> 100% gaseoso - 10 bares -recipiente tipo I	Sobrepresión y fragmentos
2 - Evento accidental en el depósito con H <sub>2</sub> líquido (caso de incendio) a 2P <sub>w</sub>	Estallido del depósito de LH <sub>2</sub> Incendio repentino	“BLEVE” con efectos térmicos
3 - Fallo en el depósito (brecha o perforación)	10 bares, propagación y evaporación rápida de H <sub>2</sub> líquido en el suelo	Vaporización de piscinas y formación de nubes criogénicas con efectos de sobrepresión en caso de ignición de nubes inflamables
4 - Fuga en la tubería entre depósito y bomba	10 bar, líquido * liberación difásica a presión * y/o piscina de H <sub>2</sub> líquido, vaporización que forma una nube inflamable	Chorro de hidrógeno líquido y posible lluvia que forma una piscina (lámina o charco) de LH <sub>2</sub> en el suelo y efectos de sobrepresión debido a la ignición de la mezcla inflamable

## Tema 5: Hidrógeno líquido

5 - Fuga en la tubería entre depósito y bomba	1000 bar, líquido * liberación presurizada difásica pero que se comporta como un chorro gaseoso de alta presión	Comportamiento casi de chorro de alta presión cuasi gaseoso con efectos de sobrepresión debido a la ignición
6 - Estallido del depósito a la presión de ruptura ( $P_R$ )	100% gaseoso - 10 bares, tipo I	Sobrepresión y fragmentos

Nota: BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (explosión de vapores con líquidos en ebullición en expansión).

En cuanto a los escenarios anteriormente resumidos, se puede destacar que algunos de ellos son específicos del hidrógeno líquido, y otros son eventos gaseosos peligrosos ya descritos, o similares.

### 4.1 Problemas fisiológicos con el hidrógeno criogénico

El hidrógeno está clasificado como no tóxico y no ácido, no cancerígeno, siendo un simple asfixiante sin valor límite umbral (TLV) o valor LD50 (dosis letal 50%) establecido [7].

La vaporización del hidrógeno líquido liberado afecta a la composición de la atmósfera, sobre todo en áreas (parcialmente) confinadas, lo que conlleva el riesgo de asfixia. La enorme relación de expansión entre líquido/ambiente, combinada con la condensación del  $O_2$  del aire ambiente y la combustión de mezclas inflamables de  $H_2$ -aire, provoca una importante dilución de la atmósfera local. La NASA considera peligrosa para las personas una fracción volumétrica de oxígeno inferior al 19,5%; menos del 8% será mortal en cuestión de minutos (Tabla 2). Los niveles de alarma se fijan por lo general en el 19% de oxígeno.

Tabla 2. Impacto en personas de una atmósfera con contenidos de oxígeno decrecientes.

Contenido de oxígeno en el aire (%)	Síntomas
~21 – 19	Ninguno
~19 – 15	Tiempos de reacción reducidos, sin efectos visibles
~15 – 12	Respiración pesada, latido cardíaco rápido, atención o coordinación alteradas
~12 – 10	Mareos, fallos de juicio, mala coordinación muscular, fatiga rápida, labios algo azulados
~10 – 8	Náusea, vómitos, incapacidad para moverse, pérdida de consciencia seguida de muerte
~8 – 6	Daño cerebral después de 4-8 min, muerte en 8 min
< 6	Coma después de 40 seg, insuficiencia respiratoria, muerte

## Tema 5: Hidrógeno líquido

El contacto directo con hidrógeno líquido o con superficies a muy baja temperatura genera "quemaduras" criogénicas similares a las térmicas. Los tejidos vivos se congelan, excepto en periodos de contacto muy breves en los que la diferencia de temperatura entre el criógeno y la piel sigue siendo alta (régimen de ebullición de película) y la transferencia de calor es pequeña. La congelación de la piel sobre una superficie fría puede provocar graves daños al retirarla. La exposición prolongada de la piel al hidrógeno frío puede provocar congelación. Un síntoma es el dolor local de corta duración. Los tejidos congelados son indoloros y tienen un aspecto ceroso, con un color blanquecino o amarillento pálido. La descongelación del tejido congelado puede causar dolor intenso. También puede producirse una conmoción. La inhalación prolongada de vapores o gases fríos puede causar graves daños pulmonares. Los ojos son especialmente sensibles al frío. Una exposición más prolongada a temperaturas frías, tras un gran derrame, reduce la temperatura corporal lo que provoca hipotermia, disfunción de órganos y depresión respiratoria [5].

No existen riesgos medioambientales significativos asociados al vertido accidental de hidrógeno líquido debido a su carácter no tóxico.

### 4.2 Ignición inmediata de un escape de LH<sub>2</sub> a presión

La ignición inmediata de un chorro de LH<sub>2</sub> a alta presión parece ser similar a la de un chorro de hidrógeno gaseoso a alta presión, con los efectos de sobrepresión debidos a la ignición.

## 5. Tecnología de hidrógeno líquido

### 5.1 Proceso e infraestructuras de producción del hidrógeno líquido

Uno de los retos de la puesta en marcha de una economía del hidrógeno es el establecimiento de una infraestructura eficiente de producción y suministro. En la distribución a gran escala se ve favorecida la fase líquida, relativamente densa, del LH<sub>2</sub>, pero la licuefacción sigue adoleciendo de bajas eficiencias energéticas. Históricamente, el LH<sub>2</sub> se utilizaba ante todo como combustible para cohetes, ya que la baja eficiencia en la producción no importaba. En EE.UU. se lanzó un importante plan de licuefacción de hidrógeno dentro de los programas espaciales, que propició el diseño y la construcción de plantas de licuefacción a gran escala.

### 5.2 Almacenamiento y transporte de hidrógeno líquido

#### 5.2.1 Almacenamiento de hidrógeno líquido

Los almacenes de hidrógeno líquido ya existen para los profesionales desde hace mucho tiempo, pero todavía no existe ningún almacenamiento de hidrógeno líquido de carácter público. Los depósitos de almacenamiento de LH<sub>2</sub> pueden contener más hidrógeno que los de GH<sub>2</sub>: la capacidad volumétrica del LH<sub>2</sub> es de 0,070 kg/L frente a los 0,030 kg/L de los

## Tema 5: Hidrógeno líquido

tanques de  $\text{GH}_2$  a 700 bar. Sin embargo, para la licuefacción se necesita una cantidad importante de energía (alrededor del 30% de la energía contenida en el hidrógeno). El hidrógeno se puede licuar para simplificar su transporte o almacenamiento. Todos los grandes proveedores de gas industrial disponen de camiones cisterna de suministro criogénico. El  $\text{LH}_2$  se utiliza en las estaciones de repostaje de hidrógeno y en las aplicaciones de aviación.

Los principales componentes del tanque de  $\text{LH}_2$  a bordo se muestran en la [Figura 2](#). Incluyen:

- Contenedor de almacenamiento de  $\text{LH}_2$ ,
- Dispositivos de cierre,
- Un sistema de recuperación de gas evaporado o regasificado ,
- Dispositivos de alivio de presión activados térmicamente (TPRD),
- Las tuberías de interconexión (si las hay) y los accesorios entre los componentes arriba mencionados.

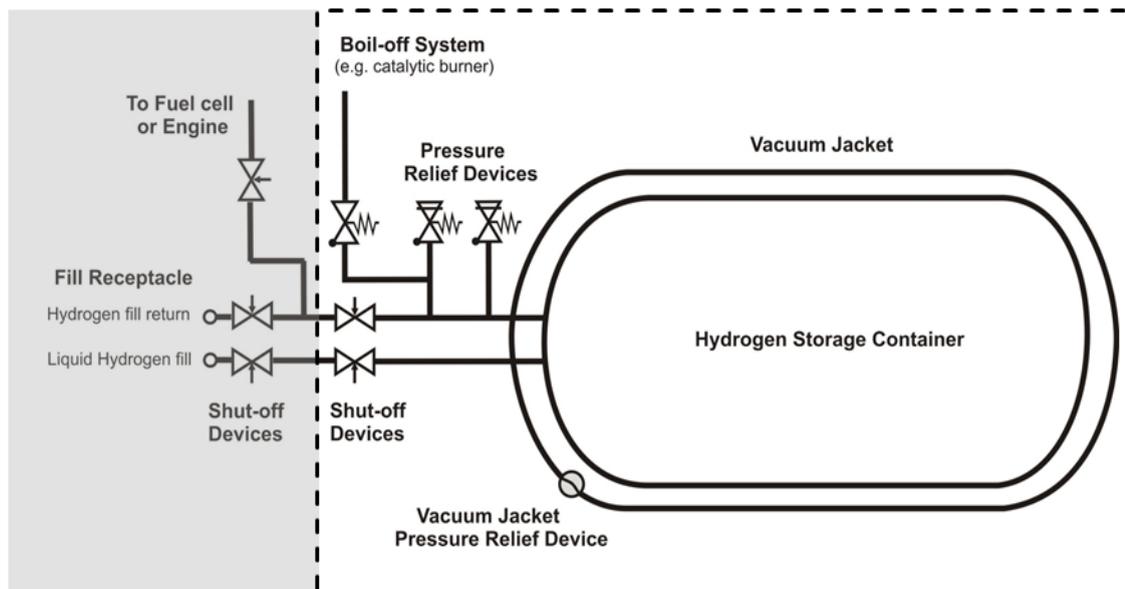


Figura 2. Representación esquemática de un sistema de almacenamiento de  $\text{LH}_2$  de Ref. [8]

Estos depósitos pueden estar en posición vertical u horizontal. El almacenamiento fijo criogénico tiene un volumen de  $10 \text{ m}^3$  a  $300 \text{ m}^3$  con una presión interna próxima a los 12 bares.

Tema 5: Hidrógeno líquido



Figura 3. Depósitos de hidrógeno líquido verticales u horizontales. (Fuente Air Liquide).

En la mayoría de los casos, los depósitos de LH<sub>2</sub> son aéreos. Sin embargo, existen casos de almacenamientos de LH<sub>2</sub> subterráneos, enterrados o en bóveda, como se ilustra y define en la Figura 4.

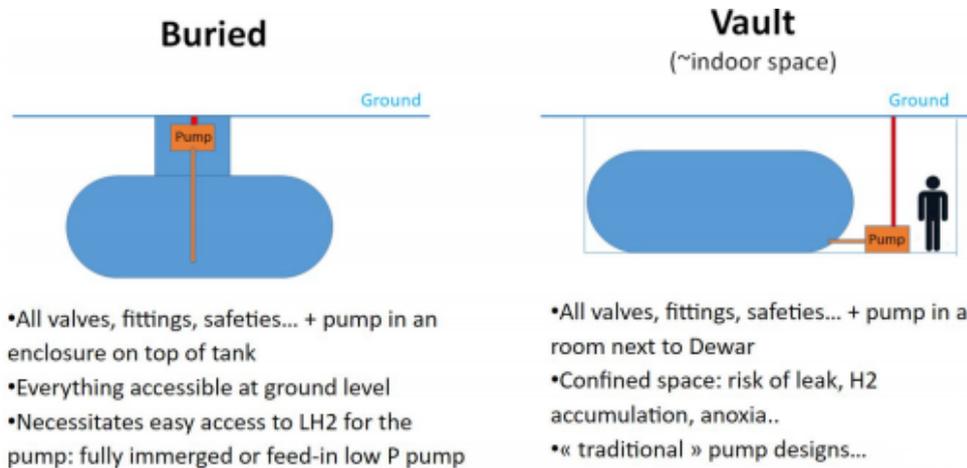


Figura 4. Los dos principales diseños posibles para depósitos subterráneos de LH<sub>2</sub>.

5.2.2 Criostato para aplicaciones fijas

Los recipientes criogénicos se han utilizado habitualmente durante más de 70 años para el almacenamiento y el transporte de hidrógeno líquido.

5.3 Estación de repostaje de hidrógeno líquido

Básicamente, como se indica en la Figura 5, una estación de repostaje de LH<sub>2</sub> consta de:

- un depósito de LH<sub>2</sub> (alrededor de 20 m<sup>3</sup> - 1000 kg-H<sub>2</sub>) con una presión operativa máxima de 10,3 bares,

## Tema 5: Hidrógeno líquido

- una línea de proceso aislada, desde el fondo del depósito hasta la bomba de LH<sub>2</sub>, que conduce el LH<sub>2</sub> desde el tanque de almacenamiento hasta un vaporizador; este dispositivo permite bombear LH<sub>2</sub> hasta a 1000 bares,
- un calentador (denominado VAP: aceite caliente o eléctrico para calentar el hidrógeno a 1000 bares),
- Almacenamiento temporal (o de reserva) de 1000 bares (algunos m<sup>3</sup>); estos reservorios son generalmente botellas o depósitos de tipo I o II (es decir, cilindros metálicos o tubos metálicos largos).

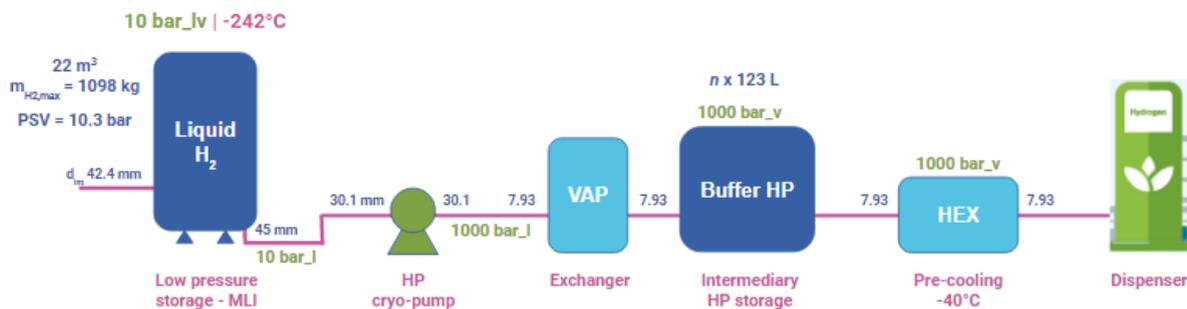


Figura 5. Esquema simplificado de una estación de repostaje de hidrógeno líquido.

Todas las demás partes (por ejemplo, el surtidor, la manguera de llenado, etc.) de la estación de servicio son similares a las de una estación de servicio clásica para gases (véase la comparación en la Figura 6).

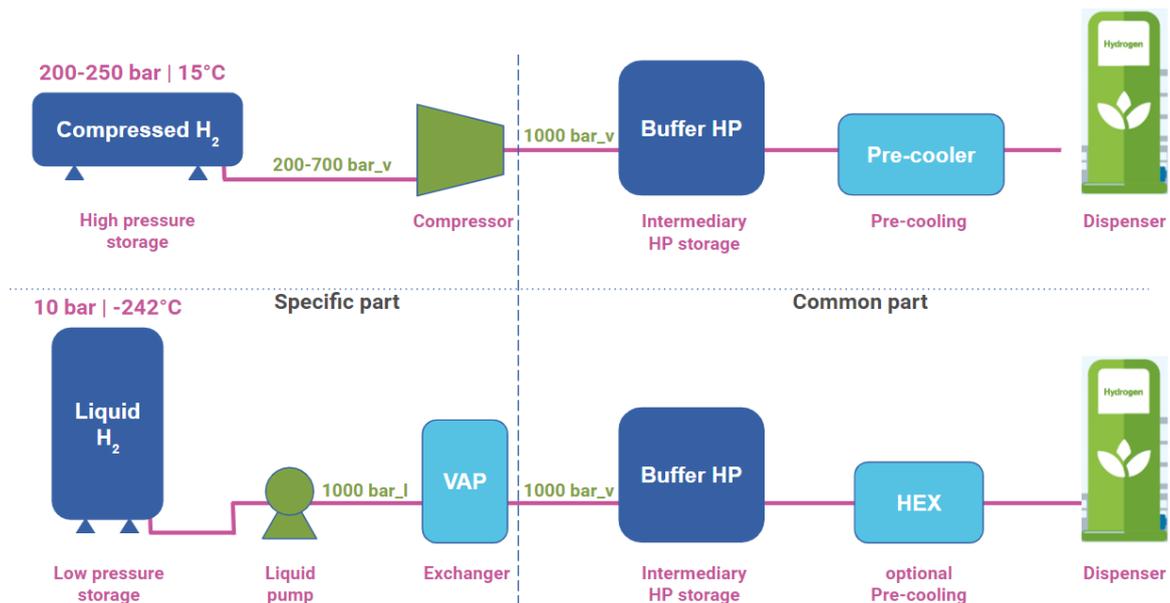
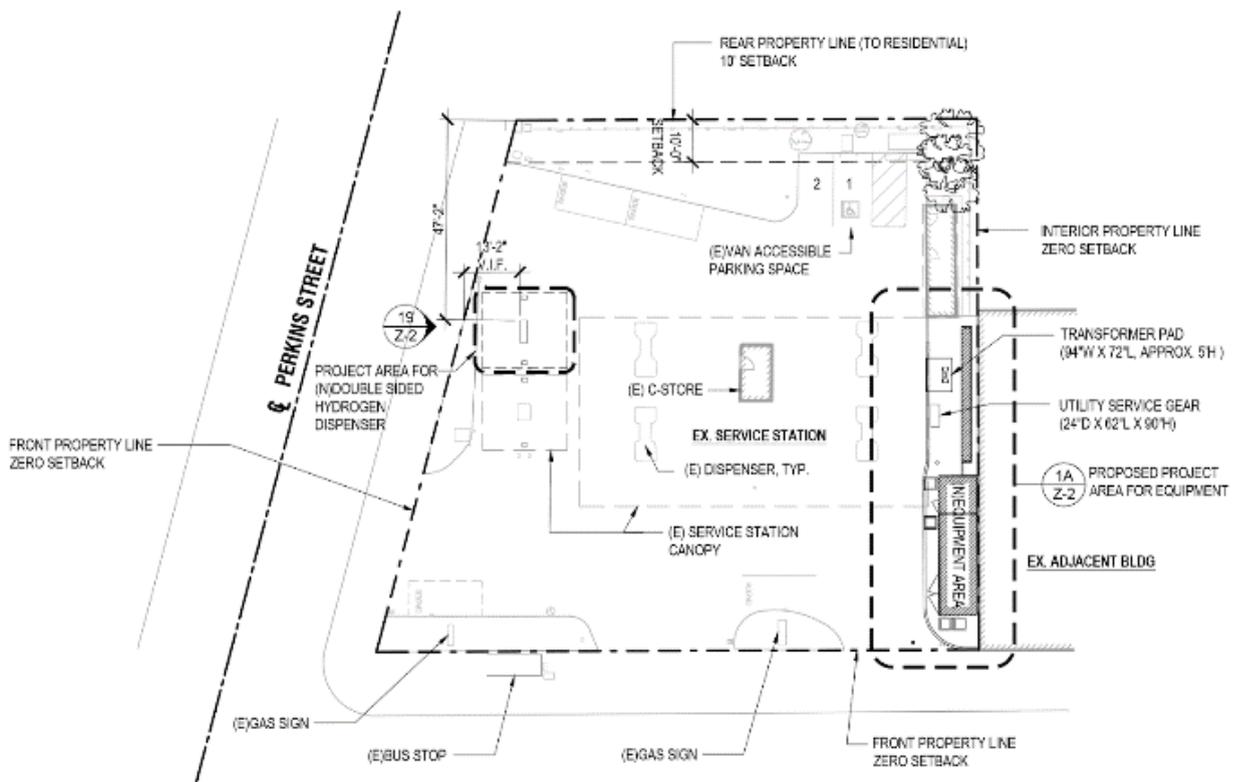


Figura 6. Comparación simplificada entre las estaciones de repostaje de hidrógeno líquido y gaseoso. Arriba: HRS (Hydrogen refuelling station) gaseoso, abajo HRS líquido.

## Tema 5: Hidrógeno líquido

El depósito de LH<sub>2</sub> es suministrado por un camión de LH<sub>2</sub>. Este camión de LH<sub>2</sub> está compuesto por un depósito horizontal de 40 m<sup>3</sup> que funciona entre 1 y 12 bares (según inventario del proveedor: 4 t-H<sub>2</sub>). La conexión entre el depósito y el camión se realiza mediante una línea de transferencia flexible. La transferencia se realiza sin bomba, utilizando la diferencia de presión. Un pequeño vaporizador está presente en el remolque para producir un aumento de presión en el tanque del camión y permitir la transferencia del hidrógeno líquido al depósito vertical fijo que haya en la estación de repostaje.

Más concretamente, debajo de la estación de repostaje de hidrógeno líquido Linde instalada en Oakland (EE.UU.) (véase [Figura 7](#)).



## Tema 5: Hidrógeno líquido

Figura 7. Estación de repostaje de hidrógeno líquido Linde y disposición en Oakland.  
(Fuentes: Linde)

En Francia se requiere una distancia de seguridad de 20 m entre el público general y la fuente de hidrógeno líquido. Las características de seguridad en estaciones de repostaje líquido son casi las mismas que para una estación de repostaje gaseoso (véase [Tabla 3](#)).

Tabla 3. Características de seguridad para estaciones de repostaje de hidrógeno gaseoso/licuado.

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 <sub>2</sub>	Dentro del contenedor de proceso Dentro del surtidor	Activar la advertencia, y las válvulas de cierre si es necesario en caso de fuga accidental
Detector de llama (UV/IR)	En el contenedor de proceso En el exterior, cerca del surtidor	Activar la advertencia y, si es necesario, las válvulas de cierre en caso de fuga accidental
Una válvula de cierre automática	Varias entre el depósito de H <sub>2</sub> y el surtidor	Limitar el inventario de H <sub>2</sub> en caso de escape accidental
Control de la presión del proceso	General	Detectar una caída de presión anormal debida a una fuga o a la rotura de un conducto
Espacios cerrados con ventilación natural	Contenedor de proceso Surtidor	Evitar alcanzar los límites de inflamabilidad de la mezcla H <sub>2</sub> -aire en caso de escape accidental
Ventilación forzada	Contenedor de proceso para algunos modelos	Evitar alcanzar los límites de inflamabilidad de la mezcla de H <sub>2</sub> -aire en caso de fuga accidental si la ventilación natural no es posible o no es lo suficientemente eficaz
Equipo con certificación ATEX	En espacios cerrados donde pueden producirse fugas (por ejemplo, patines y surtidor)	Evitar fuentes de ignición

## Tema 5: Hidrógeno líquido

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

### 5.3.1 Autobuses

La mayoría de los autobuses transportan el hidrógeno como gas comprimido. Sin embargo, hay algunos ejemplos en los que el hidrógeno se almacena en forma líquida.

## 6. Peligros del hidrógeno líquido y riesgos asociados para los intervinientes

A continuación se describen los peligros para la salud asociados a un escape de hidrógeno licuado.

- El contacto con el hidrógeno líquido o sus salpicaduras en la piel o en los ojos puede provocar graves quemaduras por frío, por congelación o por hipotermia.

## Tema 5: Hidrógeno líquido

- Las quemaduras criogénicas también pueden producirse por el contacto de partes del cuerpo humano no protegidas con fluidos fríos o superficies frías.
- La inhalación de vapores fríos de hidrógeno puede causar problemas respiratorios y puede provocar asfixia.
- El contacto físico directo con el LH<sub>2</sub>, los vapores fríos o el equipo frío puede causar graves daños en la piel y los tejidos. El contacto momentáneo con una pequeña cantidad del líquido quizá no suponga un peligro tan grande de quemadura porque puede formarse una película protectora de hidrógeno gaseoso en evaporación. El peligro de congelación se produce cuando se derraman grandes cantidades y la exposición es amplia<sup>1</sup>.
- El personal no debe tocar las partes metálicas frías y debe llevar ropa protectora. También, se debe proteger la zona afectada con una cubierta suelta.
- Es probable que se produzcan afecciones cardíacas cuando la temperatura corporal interna desciende a 27°C o menos, y puede producirse la muerte cuando la temperatura corporal interna desciende a menos de 15°C.
- Además, existe riesgo de asfixia si el hidrógeno licuado se libera y vaporiza en el interior.

## Referencias

1. Rossini FD. A report on the international practical temperature scale of 1968. Comisión I.2: Termodinámica y termoquímica. Unión Internacional de Química Pura y Aplicada. P.557-P.570.
2. Cengel, Yunus A. y Turner, Robert H. (2004). Fundamentals of thermal-fluid sciences, McGraw-Hill, p.78.
3. Klier J., et al, A new cryogenic high-pressure H<sub>2</sub> test area: First results. Proc 12<sup>th</sup> IIR Int Conf, Dresden (2012).
4. Edeskuty F.J., Stewart W.F., Safety in the handling of cryogenic fluids. The International Cryogenics Monograph Series, Plenum Press, Nueva York (1996).

---

<sup>1</sup> Efecto del nitrógeno líquido: <https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZIQk80A&feature=voutu.be&t=291>

## Tema 5: Hidrógeno líquido

5. Bonhoeffer, K.F., Harteck, P. Experimente über Para- und Orthowasserstoff. *Naturwissenschaften* 17, 182 (1929).
6. Proust C., investigación INERIS en el marco de PRESLHY. Presentación en el 13<sup>a</sup> Simposio inter. sobre peligros, prevención y mitigación de explosiones industriales (ISHPMIE), Braunschweig (2020).
7. NASA. Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger accident (1986). (1997). Disponible en <http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/table-of-content.s.html> [consultado el 04/04/2021]
8. GTR, Proposal for a Global Technical Regulation (GTR) on hydrogen fuelled vehicles, 2013. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/41. Naciones Unidas. Comisión Económica para Europa. Comité de Transportes Interiores. Foro Mundial de Armonización de Normas sobre Vehículos, Sesión 160, Ginebra, 25-28 junio 2013.