EH2TA

Education in Hydrogen Technologies Area

# ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE HIDRÓGENO

Co-funded by the European Union

Project is supported within the Erasmus+ programme 2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

# CONTENIDO

Contenido ..... 2
Introducción ..... 4
1 Seguridad laboral durante el almacenamiento y el transporte de hidrógeno ..... 5
2 Transporte de hidrógeno ..... 7
2.1 Transporte de hidrógeno comprimido en contenedores por carretera o ferrocarril ..... 8
2.2 Transporte de hidrógeno licuado en contenedores por carretera, ferrocarril o barco ..... 9
2.3 Transporte de hidrógeno por gasoducto con mezcla de gas natural ..... 11
2.4 Separación de hidrógeno de la mezcla de gas natural mediante separación de gases por membrana ..... 12
2.5 Transporte de hidrógeno limpio a través de un gasoducto existente adaptado al hidrógeno limpio 14
2.6 Transporte de hidrógeno puro a través de una tubería de nueva construcción ..... 15
2.6.1 La red troncal europea del hidrógeno ..... 17
2.6.2 Ejemplo de realización de una red nacional de hidrógeno ..... 20
2.7 LOHC ..... 20
2.7.1 Ejemplo práctico de utilización de LOHC ..... 21
3 Almacenamiento de hidrógeno ..... 25
3.1 Almacenamiento de hidrógeno comprimido ..... 26
3.2 Almacenamiento de hidrógeno líquido ..... 29
3.3 Almacenamiento de hidrógeno en contenedores subterráneos en mezcla con metano o amoníaco ..... 31
3.4 Almacenamiento de hidrógeno en hidruros ..... 32
3.4.1 Hidruros metálicos ..... 34
3.5 Almacenamiento de hidrógeno en recipientes de carbono ..... 35
4 Componentes ..... 40
4.1 Depósitos a presión ..... 41
4.2 Depósitos criogénicos ..... 43
4.3 Depósitos de alta presión ..... 44
5 Lista de fuentes ..... 46
6 Lista de imágenes y cuadros ..... 48
7 Lista de abreviaturas ..... 49

Cofinanciado por la Unión Europea. Las opiniones y puntos de vista expresados sólo comprometen a su(s) autor(es) y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los de la Agencia Europea de la Educación y Cultura (EACEA). Ni la Unión Europea ni la EACEA pueden ser considerados responsables de ellos."

# INTRODUCCIÓN

El hidrógeno puede almacenarse de varias formas: como gas, líquido o sólido, como un hidruro metálico o un compuesto químico. El método más común de almacenamiento de hidrógeno es como gas comprimido en tanques de alta presión. Este método tiene la ventaja de ser relativamente sencillo y barato, pero la densidad de almacenamiento es relativamente baja, por lo que se necesitan grandes depósitos para almacenar una cantidad utilizable de hidrógeno.

El hidrógeno también puede almacenarse como líquido en tanques criogénicos, diseñados para almacenar materiales a temperaturas extremadamente bajas. El hidrógeno líquido tiene una densidad de almacenamiento mucho mayor que el hidrógeno gaseoso, por lo que puede almacenarse en tanques más pequeños. Sin embargo, los tanques y equipos necesarios para almacenar y manipular hidrógeno líquido son más caros y complejos que los necesarios para el almacenamiento de gas comprimido.

Otro método de almacenamiento de hidrógeno consiste en almacenarlo en forma sólida, como en un hidruro metálico o un compuesto químico. Este método tiene la ventaja de poder almacenar grandes cantidades de hidrógeno en poco espacio, pero suele ser más caro y menos eficaz que los otros métodos.

También existen varios métodos para transportar el hidrógeno: por camión, tren, barco o tubería. El método más común es el camión, con tanques similares a los utilizados para almacenar hidrógeno. El hidrógeno también puede transportarse por tren o barco en tanques criogénicos, o a través de gasoductos como el gas natural.

En general, el desarrollo de métodos eficaces y eficientes para almacenar y transportar hidrógeno es un área importante de investigación y desarrollo, ya que el hidrógeno tiene el potencial de ser una forma de almacenar energía.

# 1 SEGURIDAD LABORAL DURANTE EL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE HIDRÓGENO

El hidrógeno es un gas altamente inflamable y debe manipularse con cuidado para garantizar la seguridad. Cuando se almacena o transporta, el hidrógeno debe mantenerse a altas presiones o a temperaturas extremadamente bajas para reducir el riesgo de explosión. Esto puede hacer que el almacenamiento y el transporte sean más difíciles y caros que en el caso de otros tipos de combustible.

Uno de los principales problemas del almacenamiento de hidrógeno es la posibilidad de fugas. El hidrógeno puede fugarse de los tanques de almacenamiento y las tuberías, lo que puede dar lugar a la formación de mezclas inflamables o explosivas. Para minimizar el riesgo de fugas, los tanques de almacenamiento y las tuberías deben diseñarse y construirse de acuerdo con estrictas normas de seguridad. Las inspecciones y el mantenimiento periódicos también son cruciales para garantizar que estos sistemas se mantengan en buen estado de funcionamiento.

El transporte de hidrógeno suele realizarse por camión, ferrocarril o barco. El transporte por camión y ferrocarril suele hacerse en grandes cisternas o contenedores especialmente diseñados para soportar las altas presiones o las bajas temperaturas necesarias para el almacenamiento de hidrógeno. El transporte de hidrógeno suele hacerse en forma de líquido criogénico, lo que requiere contenedores aislados diseñados para mantener el hidrógeno a temperaturas extremadamente bajas.

Otro problema de seguridad importante es la posibilidad de que se produzcan incendios y explosiones de hidrógeno. El hidrógeno es un gas altamente inflamable, y si se fuga y entra en contacto con una fuente de ignición, puede provocar un incendio o una explosión. Para minimizar el riesgo de incendios y explosiones de hidrógeno, las instalaciones de almacenamiento y transporte deben estar situadas lejos de zonas pobladas y disponer de sistemas de extinción de incendios.

En general, el almacenamiento y el transporte de hidrógeno requiere un estricto cumplimiento de los protocolos de seguridad, un diseño y un mantenimiento adecuados de los equipos y la existencia de planes de respuesta a emergencias para minimizar los posibles peligros. Aunque el hidrógeno tiene el potencial de ser una forma de almacenar energía, es importante que se tomen las medidas de seguridad adecuadas para proteger a las personas y los bienes.

Riesgos potenciales asociados al almacenamiento de gas hidrógeno comprimido:

- Es difícil identificar la liberación de hidrógeno porque el gas es inodoro, incoloro e insípido.

- El hidrógeno puede provocar la fragilización de los metales. Esto puede provocar una reducción de la resistencia del material y, posteriormente, la rotura del recipiente, lo que da lugar a una fuga de hidrógeno.
- Acumulación de hidrógeno durante largos periodos de tiempo en espacios confinados como garajes o talleres mecánicos, habitáculos de vehículos. Puede producirse asfixia debido al desplazamiento del aire por el hidrógeno.
- Formación de mezclas inflamables de hidrógeno-oxígeno o hidrógeno-aire. La aspiración de una mezcla inflamable en el sistema de ventilación de un edificio puede provocar una detonación.
- La explosión del recipiente acompañada de una onda de presión puede provocar daños en el tímpano, la rotura del recipiente, la proyección de escombros, la rotura de cristales, etc.
- El hidrógeno se enciende fácilmente porque su MIE (Minimun ignition energy) es de 0,017 mJ (10 veces inferior al de otros combustibles). Una chispa estática puede inflamar el hidrógeno liberado.
- Cuando arde hidrógeno puro, sus llamas son invisibles a la luz del día.
- El hidrógeno arde rápidamente y no produce humo.
- El fuego externo, el calor o la radiación térmica pueden provocar la rotura mecánica del depósito debido a la descomposición térmica del polímero y de los materiales compuestos (Hy Responder Lecture 3: Hydrogen storage, 2021, s. 13-14).

Directrices generales para trabajar de forma segura con gas hidrógeno:

- Siga todas las normas y directrices de seguridad para la manipulación del hidrógeno gaseoso. Esto puede incluir el uso de equipos de protección personal como guantes, gafas y ropa ignífuga.
- Tenga cuidado al manipular botellas de gas hidrógeno u otros recipientes. Éstos deben manipularse con cuidado para evitar daños en el recipiente, lo que podría provocar una fuga o una liberación de gas hidrógeno.
- Mantenga el gas hidrógeno alejado de fuentes de ignición, como llamas abiertas, chispas y equipos eléctricos.
- Cuando transporte hidrógeno gaseoso, asegúrese de que el gas está contenido en un recipiente adecuado, diseñado para hidrógeno gaseoso y en buen estado.
- Almacenar el hidrógeno gaseoso en un área bien ventilada, lejos de fuentes de ignición.

- Tenga cuidado al transportar hidrógeno gaseoso de un recipiente a otro. Asegúrese de que los recipientes estén bien sujetos y de que el transporte se realiza lentamente para evitar derrames o fugas.
- En caso de fuga o derrame de gas hidrógeno, evacue la zona inmediatamente y ventile el área para dispersar el gas. No intente reparar la fuga o el derrame usted mismo; en su lugar, solicite ayuda profesional.
- Comprobar periódicamente el estado de los depósitos y equipos de gas hidrógeno para asegurarse de que funcionan correctamente y no suponen un riesgo para la seguridad.
- Asegúrese de que todos los trabajadores que manipulan gas hidrógeno están debidamente formados y familiarizados con los peligros asociados al gas.

**Imagen no. 1: Panel de advertencia.**

# 2 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO

## INTRODUCCIÓN

El hidrógeno puede transportarse de varias formas: por camión, barco, ferrocarril o gasoducto.

Un método habitual de transporte de hidrógeno es por camión, utilizando remolques cisterna criogénicos para líquidos. Estos remolques están diseñados para transportar hidrógeno licuado a

temperaturas extremadamente bajas (-253 °C), lo que reduce el volumen del hidrógeno y permite un transporte más eficiente.

Otra opción es transportar el hidrógeno por barco, ya sea como líquido criogénico o como gas comprimido. El hidrógeno líquido criogénico puede transportarse en buques cisterna especializados, similares a los utilizados para el transporte de gas natural licuado (GNL). El hidrógeno gaseoso comprimido también puede transportarse en contenedores diseñados para soportar altas presiones.

Por último, el hidrógeno también puede transportarse por tuberías, como el gas natural. Este método sólo suele ser práctico en distancias cortas, ya que el hidrógeno tiende a escaparse de las tuberías con más facilidad que el gas natural. Sin embargo, puede ser una opción eficaz para transportar hidrógeno desde un lugar de producción hasta un centro de almacenamiento o distribución cercano.

### PALABRAS CLAVE

Hidrógeno licuado, tubería de hidrógeno comprimido, contenedor, transporte, cisterna, tren, camión, gas, barco, separación por membranas, LOHC

## 2.1 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO EN CONTENEDORES POR CARRETERA O FERROCARRIL

El hidrógeno puede transportarse en contenedores por carretera, ya sea como gas comprimido o como líquido. Cuando el hidrógeno se transporta como gas comprimido, suele almacenarse en depósitos de alta presión montados en un remolque o camión. Los depósitos suelen ser de fibra de carbono o de acero y están diseñados para soportar las altas presiones a las que se almacena el hidrógeno.

A la hora de transportar hidrógeno por carretera hay que tener en cuenta una serie de factores, como el tamaño y el peso de los contenedores, la posibilidad de fugas o accidentes y la necesidad de respetar las normas de seguridad. Es importante asegurarse de que los contenedores están correctamente diseñados y mantenidos, y de que los conductores están formados para manejarlos con seguridad. Además, es importante seguir todas las normativas y directrices pertinentes.

El transporte de hidrógeno por tren presenta una serie de ventajas, como la posibilidad de transportar grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias, el coste relativamente bajo del transporte ferroviario en comparación con otros modos de transporte y el menor impacto sobre el medio ambiente en comparación con otros modos de transporte. Sin embargo, también hay que tener en cuenta algunos retos, como la necesidad de cumplir las normas de seguridad y la posibilidad de que se

produzcan accidentes o fugas. Es importante asegurarse de que los contenedores están diseñados y mantenidos adecuadamente, y de que los vagones están equipados con los elementos de seguridad apropiados.

El hidrógeno puede transportarse en tres estados. En estado gaseoso puede transportarse principalmente en grandes cantidades de pequeñas botellas o almacenarse en varios recipientes horizontales largos.

Los datos de Platts muestran que, mientras que un solo camión puede transportar entre 500 kg y 1.100 kg de hidrógeno en forma gaseosa, un camión que transporte hidrógeno licuado puede transportar hasta 3.500 kg (S&P Global Commodity Insights, 2021).

Hoy en día, el hidrógeno se transporta sobre todo como gas comprimido en recipientes a presión de hierro o compuestos de tubos de carbono. El hidrógeno en recipientes a presión puede transportarse en cilindros a presión con una presión de 200 a 300 bares. Los vehículos impulsados por hidrógeno utilizan depósitos a presión más pequeños con una presión de 350 o 700 bares.

**Foto nº 2: Transporte de hidrógeno en contenedores por carretera.**

## 2.2 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LICUADO EN CONTENEDORES POR CARRETERA, FERROCARRIL O BARCO

El hidrógeno puede transportarse en su forma líquida, denominada hidrógeno líquido criogénico (LH2). Debe almacenarse y transportarse a temperaturas extremadamente bajas, normalmente en torno a -

253°C. El LH2 presenta una serie de ventajas como combustible para el transporte. Tiene una alta densidad energética, lo que significa que una cantidad relativamente pequeña de LH2 contiene una gran cantidad de energía. También es un combustible de combustión limpia, ya que sólo produce agua cuando se quema.

Sin embargo, el transporte de LH2 también plantea una serie de problemas. Requiere infraestructuras de almacenamiento y transporte especializadas y costosas, ya que debe mantenerse a temperaturas extremadamente bajas para seguir siendo líquido. También es un combustible muy volátil, que puede plantear riesgos de seguridad si no se manipula adecuadamente. A pesar de estas dificultades, el LH2 tiene potencial para convertirse en un importante combustible de transporte en el futuro, sobre todo para el traslado de mercancías a largas distancias.

El hidrógeno puede transportarse por carretera en forma líquida en camiones cisterna criogénicos especializados, diseñados para transportar líquidos extremadamente fríos, como el hidrógeno líquido. Estos camiones cisterna suelen ser de acero inoxidable y están aislados para ayudar a mantener la temperatura extremadamente baja del hidrógeno líquido. Los propios tanques están diseñados para soportar la alta presión generada por la expansión del hidrógeno líquido a medida que se calienta.

Para cargar el hidrógeno líquido en el camión cisterna, se transfiere desde un tanque de almacenamiento al camión cisterna mediante una línea de transferencia. La línea de transferencia está equipada con una serie de válvulas y dispositivos de seguridad para evitar derrames y accidentes. El camión cisterna también tiene sus propios sistemas de seguridad, como válvulas de alivio de presión, para evitar accidentes durante el transporte.

Una vez que el camión cisterna está cargado de hidrógeno líquido, puede ser transportado a su destino utilizando las mismas carreteras y autopistas que utilizan otros vehículos. El conductor del camión cisterna debe estar especialmente formado para manejar las propiedades únicas del hidrógeno líquido y seguir todos los protocolos de seguridad. El camión cisterna también debe conducirse con cuidado para evitar empujar el depósito, lo que podría hacer que el hidrógeno líquido hirviera y se convirtiera en gas, aumentando la presión dentro del depósito.

Es importante señalar que el transporte de hidrógeno en cualquiera de sus formas, incluido el hidrógeno líquido, conlleva ciertos riesgos y exige la aplicación de estrictas medidas de seguridad para evitar accidentes.

El transporte de hidrógeno por barco es una opción potencial para trasladar grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias. Sin embargo, para que esta opción sea viable, hay que afrontar varios retos. Uno de ellos es el diseño de contenedores criogénicos que puedan soportar las duras

condiciones del transporte marítimo. Además, hay que tener en cuenta consideraciones de seguridad a la hora de manipular y almacenar líquidos criogénicos, como el riesgo de derrames y fugas.

A pesar de estas dificultades, se están desarrollando métodos seguros y rentables para transportar hidrógeno por barco. Por ejemplo, el proyecto HYFLEET:CUTE de la Unión Europea demostró la viabilidad de utilizar un buque a pequeña escala para transportar hidrógeno desde las instalaciones de producción en alta mar hasta los puertos para su distribución. En el futuro, es posible que el hidrógeno pueda transportarse en mayores cantidades utilizando buques específicos para el transporte de líquidos criogénicos.

**Imagen no. 3: Transporte de hidrógeno licuado en buque portacontenedores.**

## 2.3 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO POR GASODUCTO CON MEZCLA DE GAS NATURAL

El hidrógeno puede transportarse por gasoducto mezclado con gas natural, pero requiere una infraestructura específica y una manipulación cuidadosa. Cuando el hidrógeno se mezcla con gas natural, la mezcla se denomina "gas natural enriquecido con hidrógeno" o "HENG". La concentración de hidrógeno en la mezcla suele oscilar entre el 10% y el 20%.

Una de las ventajas de transportar hidrógeno de este modo es que permite utilizar los gasoductos de gas natural existentes, lo que puede resultar más rentable que construir nuevos gasoductos específicos

para el hidrógeno. Sin embargo, también hay que tener en cuenta varios retos y consideraciones a la hora de utilizar el HENG para el transporte.

Uno de los retos es que el hidrógeno es muy reactivo y puede corroer ciertos materiales, como algunos tipos de acero. Esto significa que las tuberías utilizadas para el HENG deben estar hechas de materiales compatibles con el hidrógeno, o deben estar recubiertas con una capa protectora. Además, el hidrógeno tiene un contenido energético inferior al del gas natural, por lo que el poder calorífico del HENG es menor. Esto significa que el HENG requiere un volumen mayor para proporcionar la misma cantidad de energía que el gas natural puro.

Otra consideración es que el HENG debe manipularse y almacenarse con cuidado para evitar fugas o accidentes. Por ejemplo, el HENG debe mantenerse a alta presión para reducir su volumen y facilitar su transporte. Esto significa que las instalaciones de almacenamiento y manipulación utilizadas para el HENG deben estar diseñadas para soportar las altas presiones implicadas.

En general, aunque el gas natural enriquecido con hidrógeno puede ser una forma eficaz de transportar hidrógeno, requiere una infraestructura especializada y una manipulación cuidadosa para garantizar la seguridad y eficacia del proceso.

El hidrógeno tiene un valor calorífico inferior al del gas natural a la misma presión y volumen. Su poder calorífico es aproximadamente el 30% del del gas natural. No causará ningún problema a la hora de vender gas a los clientes, ya que el precio actual de la distribución de gas se cobra en unidades de energía (KWh distribuidos) en función del valor calorífico y los sistemas de facturación utilizados tienen que modificar el valor calorífico del gas en función de las mediciones reales.

Para proporcionar la misma cantidad de calor es necesario suministrar más hidrógeno que gas natural. Una ventaja del hidrógeno reside en su menor resistencia al fluir por los gasoductos, lo que significa que la mezcla de gas natural con hidrógeno puede fluir más rápidamente. La actual capacidad de flujo de los gasoductos no supone una limitación para la mezcla de gas natural e hidrógeno en lo que respecta a la cantidad de calor transportada (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 77-78).

## 2.4 SEPARACIÓN DE HIDRÓGENO DE LA MEZCLA DE GAS NATURAL MEDIANTE SEPARACIÓN DE GASES POR MEMBRANA

La separación de gases por membrana es un proceso en el que una mezcla de gases se separa en sus componentes individuales utilizando una membrana. La membrana permite el paso de algunos gases

e impide el de otros. En el caso de la separación del hidrógeno de una mezcla de gas natural, puede utilizarse una membrana selectiva para el hidrógeno.

Existen varios tipos diferentes de membranas que pueden utilizarse para la separación del hidrógeno, como las membranas poliméricas, las membranas inorgánicas y los marcos orgánicos metálicos (MOF). Las membranas poliméricas están hechas de polímeros como polisulfonas y poliamidas, y se utilizan a menudo para separar el hidrógeno de las mezclas de gas natural debido a su alta selectividad para el hidrógeno. Las membranas inorgánicas, como las cerámicas y las de vidrio, también se utilizan para separar el hidrógeno, pero suelen ser menos selectivas que las membranas poliméricas. Los MOF son un tipo relativamente nuevo de membranas que tienen áreas superficiales elevadas y tamaños de poro ajustables, lo que las hace muy eficaces para separar gases.

El proceso de separación del hidrógeno de una mezcla de gas natural mediante una membrana consiste normalmente en presurizar la mezcla de gases en un lado de la membrana, mientras se mantiene una presión inferior en el otro lado. Las moléculas de hidrógeno pueden atravesar la membrana y pasar al lado de menor presión, mientras que los demás gases no pueden pasar. El hidrógeno separado puede recogerse y utilizarse como combustible o materia prima para procesos químicos.

Es importante señalar que la eficacia del proceso de separación puede verse afectada por una serie de factores, como el tipo de membrana utilizada, la diferencia de presión a través de la membrana y la temperatura de la mezcla de gases. Además, la pureza del hidrógeno separado dependerá de la selectividad de la membrana y de la composición de la mezcla gaseosa de partida.

Todavía es un proceso bastante nuevo y no está bien probado. No obstante, la utilización de la infraestructura actual de gas es una gran oportunidad y permite reducir considerablemente los costes de transporte del $H_2$ y disminuir su precio final para el cliente. Un separador de membrana en sí es un dispositivo relativamente barato que tiene potencial de escalabilidad. Desgraciadamente, incluso en este caso nos encontramos con ciertas imperfecciones, como por ejemplo una separación incompleta del gas. Esta tecnología también es difícil de utilizar en secciones ramificadas. En este caso, estamos hablando de un problema relacionado con la asignación desigual del hidrógeno en las ramas constituyentes. Podría provocar que algunos clientes recibieran una cantidad insuficiente de hidrógeno. El riesgo de que se produzca una escasez de energía suministrada suele ser obvio incluso desde la idea general de un sistema de este tipo. Por ejemplo, si solo hubiera un 20 % de tuberías "reservadas" para el hidrógeno, es decir, para el único medio que transporta energía para el cliente final, se produciría una reducción significativa de las capacidades de acumulación y transferencia de dicha tubería (Galík, 2021, s. 63).

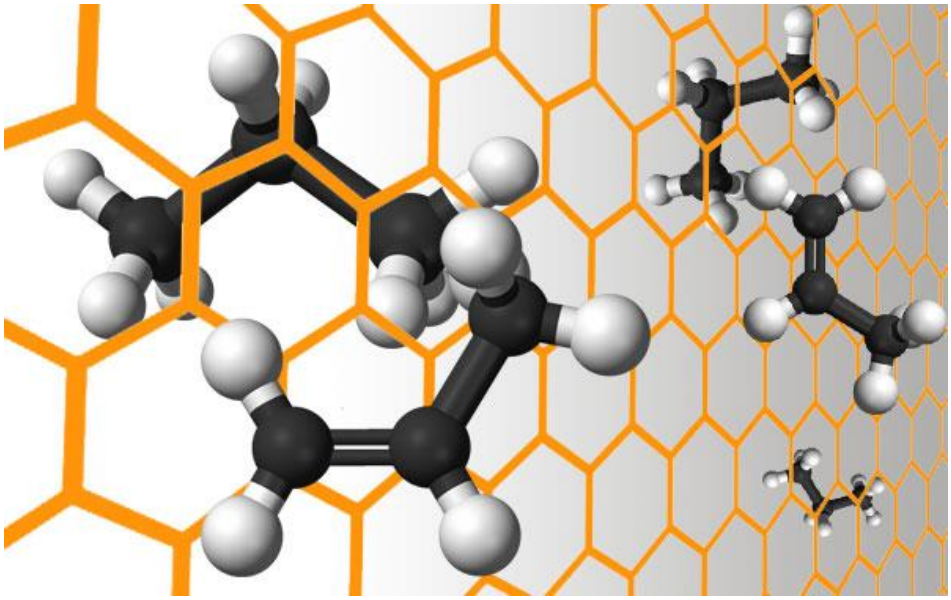

Imagen no. 4: Separación de gases por membrana.

## 2.5 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LIMPIO A TRAVÉS DE UN GASODUCTO EXISTENTE ADAPTADO AL HIDRÓGENO LIMPIO

Es posible transportar hidrógeno a través de un gasoducto de gas natural existente ajustando la tubería para manejar el gas hidrógeno. Esto puede hacerse reduciendo la presión de la tubería, aumentando el grosor de la pared de la tubería para soportar las presiones más altas del gas hidrógeno y añadiendo materiales específicos para el hidrógeno a la tubería para evitar la corrosión. El proceso de adaptar una tubería de gas natural existente para el transporte de hidrógeno se conoce como "reutilización".

Este proceso implica una serie de pasos:

- Limpieza y purga de la tubería: La tubería debe limpiarse y purgarse de cualquier residuo de gas natural u otros contaminantes antes de poder transportar hidrógeno a través de ella.
- Inspección de la tubería: La tubería debe inspeccionarse para detectar cualquier defecto o daño que pueda comprometer su integridad durante el transporte de hidrógeno.
- Realizar las reparaciones necesarias: Cualquier defecto o daño que se detecte durante el proceso de inspección debe repararse antes de que la tubería pueda utilizarse para el transporte de hidrógeno.
- Ajuste de las operaciones de la tubería: Puede que sea necesario ajustar la presión de funcionamiento y el caudal de la tubería para acomodar la transmisión de hidrógeno.
- Añadir infraestructura específica para el hidrógeno: Puede que sea necesario equipar la tubería con infraestructuras adicionales, como bombas y compresores específicos para el hidrógeno, a fin de facilitar el transporte de hidrógeno.

- Garantizar la seguridad: Es importante aplicar medidas de seguridad, como la instalación de detectores de hidrógeno y sistemas de parada de emergencia, para garantizar la transmisión segura del hidrógeno a través de la tubería.
- Sustitución de la instrumentación de los equipos eléctricos de clase ATEX IIC de la planta/tubería de hidrógeno.

Una ventaja potencial de utilizar una tubería existente para el transporte de hidrógeno es que puede ahorrar tiempo y dinero en comparación con la construcción de una nueva tubería específica para el hidrógeno. Sin embargo, la reutilización de una tubería para el transporte de hidrógeno también plantea algunos problemas y riesgos. Por ejemplo, es importante evaluar cuidadosamente el estado de la tubería y asegurarse de que es adecuada para el transporte de hidrógeno. También es importante tener en cuenta el impacto sobre la comunidad local y el medio ambiente durante el proceso de reutilización.

El estudio European Hydrogen Backbone cuenta con la idea de que el 75 por ciento de la red de distribución de hidrógeno debe basarse en la infraestructura existente, el 25 por ciento restante tendrá que construirse. La UE cuenta con una escasez de hidrógeno limpio al menos hasta 2030, lo que supondrá la necesidad de importarlo (Galík, 2021, s. 62).

El hidrógeno puede proceder de muchos más países que el gas natural. Esto hace que las importaciones sean menos dependientes geopolíticamente.

## 2.6 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO PURO A TRAVÉS DE UNA TUBERÍA DE NUEVA CONSTRUCCIÓN

El hidrógeno puede transportarse por tuberías en su forma gaseosa, igual que el gas natural. La construcción de una tubería de hidrógeno es similar a la de una de gas natural, con algunas diferencias importantes para tener en cuenta las propiedades únicas del hidrógeno.

He aquí algunas consideraciones clave para la construcción de una tubería de hidrógeno:

- Materiales: Los materiales utilizados para la construcción de la tubería deben ser capaces de resistir la naturaleza corrosiva del hidrógeno. El acero al carbono, por ejemplo, no es adecuado para las tuberías de hidrógeno, ya que puede corroerse con el tiempo. En su lugar, pueden utilizarse materiales como el acero inoxidable, el aluminio o aleaciones especiales como el inconel o el hastelloy.

- Diámetro de la tubería: El diámetro de la tubería debe elegirse en función del caudal deseado y de la presión del hidrógeno. Como el hidrógeno tiene una densidad inferior a la del gas natural, el diámetro de tubería necesario puede ser mayor para un caudal determinado.
- Soldadura: La soldadura es un paso crítico en la construcción de cualquier tubería, y deben tomarse precauciones especiales al soldar tuberías de hidrógeno. El hidrógeno puede formar mezclas inflamables con el aire, por lo que es importante purificar el aire alrededor de la zona de soldadura y utilizar gases de protección para evitar la formación de mezclas explosivas.
- Sistemas de seguridad: Las tuberías de hidrógeno deben disponer de una serie de sistemas de seguridad para evitar accidentes y fugas. Estos pueden incluir protección contra sobrepresión, sistemas de detección de fugas y sistemas de parada de emergencia.
- Permisos: Como ocurre con cualquier gran proyecto de construcción, la construcción de una tubería de hidrógeno requerirá la obtención de los permisos y aprobaciones necesarios de los organismos gubernamentales pertinentes.

En general, la construcción de una tubería de hidrógeno requiere una planificación cuidadosa y atención a los detalles para garantizar un transporte seguro y eficaz del hidrógeno.

El transporte a través de gasoductos se realiza en caso de acumulación de muchos productores y clientes en un mismo lugar. En el mundo hay muchas redes bastante grandes, la más importante probablemente en Alemania, donde la longitud total de la red supera los 200 km. La presión operativa en esta red es de 2,5 MPa, la capacidad de transporte de la red es de 50 mil. $m^3$ por hora. La tubería tiene un diámetro de 20 cm y está situada a un metro bajo tierra. La pérdida operativa es de aproximadamente el 1%. En EE.UU. (Texas) existe una red de 96 km de longitud con parámetros similares. Otras dos más pequeñas se encuentran, por ejemplo, en Francia, el Reino Unido y otros países. En el mundo hay más de 1000 km de conducciones de hidrógeno operativas (Šváb, 2006, s. 25-26).

**Imagen núm. 5: Transporte de hidrógeno por tubería.**

### 2.6.1 LA RED TRONCAL EUROPEA DEL HIDRÓGENO

La Red troncal europea del hidrógeno (EHB) es un proyecto de infraestructura cuyo objetivo es apoyar el uso del hidrógeno como fuente de energía limpia en Europa. Se trata de una red completa de instalaciones de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno que se construirá en toda la Unión Europea (UE). El objetivo de la Red Principal Europea del Hidrógeno es permitir la adopción generalizada de las tecnologías del hidrógeno en la UE, especialmente en sectores en los que resulta difícil descarbonizar utilizando otras tecnologías.

Se espera que la red troncal europea del hidrógeno sea un elemento clave de los esfuerzos de la UE por descarbonizar su sistema energético y cumplir sus objetivos climáticos y energéticos. Su objetivo es apoyar el desarrollo de diversos sectores, como el transporte, la industria y la generación de electricidad.

Aún no se han concretado los detalles específicos de la red troncal europea del hidrógeno, incluida la ubicación exacta de las instalaciones de producción, almacenamiento y distribución. Sin embargo, la Comisión Europea ha identificado una serie de retos clave que deben abordarse para hacer realidad la red troncal europea del hidrógeno. Entre ellos figuran los siguientes:

- Desarrollar tecnologías de producción rentables y eficientes: El hidrógeno puede producirse mediante diversas tecnologías, como la electrólisis, el reformado de metano con vapor y la

gasificación de biomasa. Sin embargo, en la actualidad estas tecnologías son relativamente caras e ineficaces, y será necesario mejorarlas para que la producción de hidrógeno sea competitiva con otras fuentes de energía.

- Construir la infraestructura necesaria: Para apoyar el uso generalizado del hidrógeno, se necesitará una red completa de instalaciones de producción, almacenamiento y distribución. Esto requerirá importantes inversiones en infraestructuras, como tuberías, tanques de almacenamiento y estaciones de servicio.
- Garantizar la seguridad y fiabilidad de los sistemas de hidrógeno: El hidrógeno es un gas muy inflamable, por lo que hay que velar por la seguridad y fiabilidad de los sistemas de hidrógeno. Para ello será necesario desarrollar normas de seguridad adecuadas y establecer procedimientos de seguridad sólidos.
- Superar las barreras normativas: El desarrollo de la red troncal europea del hidrógeno requerirá la coordinación de esfuerzos entre varios países y sectores diferentes. Para ello será necesario desarrollar un marco normativo que favorezca el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno.

En general, la red troncal europea del hidrógeno es un proyecto ambicioso y complejo que requerirá una inversión y una coordinación considerables para tener éxito. Sin embargo, si tiene éxito, puede desempeñar un papel importante en la descarbonización del sistema energético de la UE y en la consecución de sus objetivos climáticos y energéticos.

Se espera que los costes totales de inversión de la red troncal europea del hidrógeno prevista para 2040 oscilen entre 27 000 y 64 000 millones de euros, lo que cubriría todo el coste de capital de la construcción y modernización de la red troncal. Esto contrasta con los cientos de miles de millones de inversiones en producción de hidrógeno ecológico que prevé la Estrategia del Hidrógeno de la CE, ya para el período que va hasta 2030. La red troncal, de 22 900 km, constará de un 75% de gasoductos modernizados, con diámetros comprendidos entre 60 y 120 cm, y proporcionará una capacidad de transporte de 3 a 13 GW (LHV) por gasoducto. En el caso medio, el 60% de los costes totales de inversión se dedicarán a las obras de los gasoductos y el 40% restante a los equipos de compresión.

Aunque el 75% de la red total, es decir, casi 18.000 km, consistirá en infraestructuras modernizadas, esto representa sólo alrededor del 50% de la inversión total, lo que demuestra el valor de aprovechar los conductos existentes (European Hydrogen Backbone Report, 2020, s. 11).

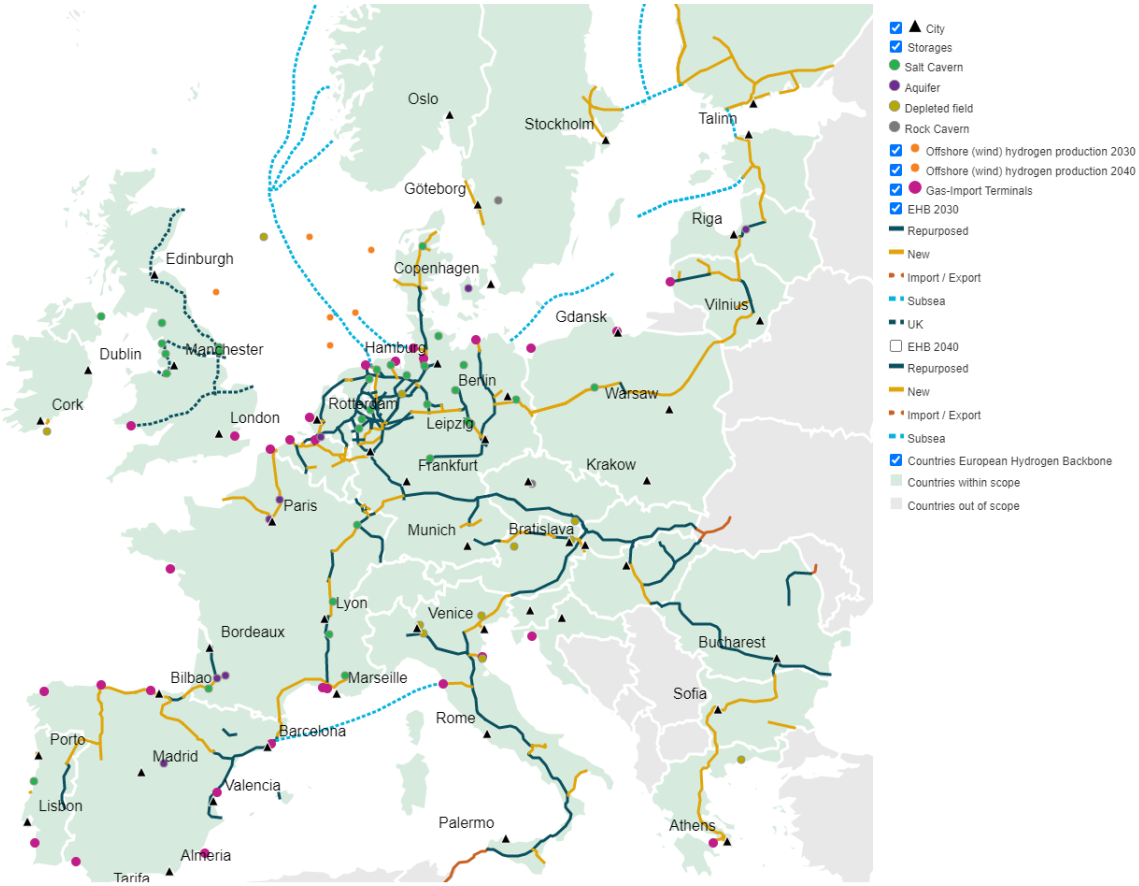


**Imagen no. 6: La red troncal europea del hidrógeno 2030.**

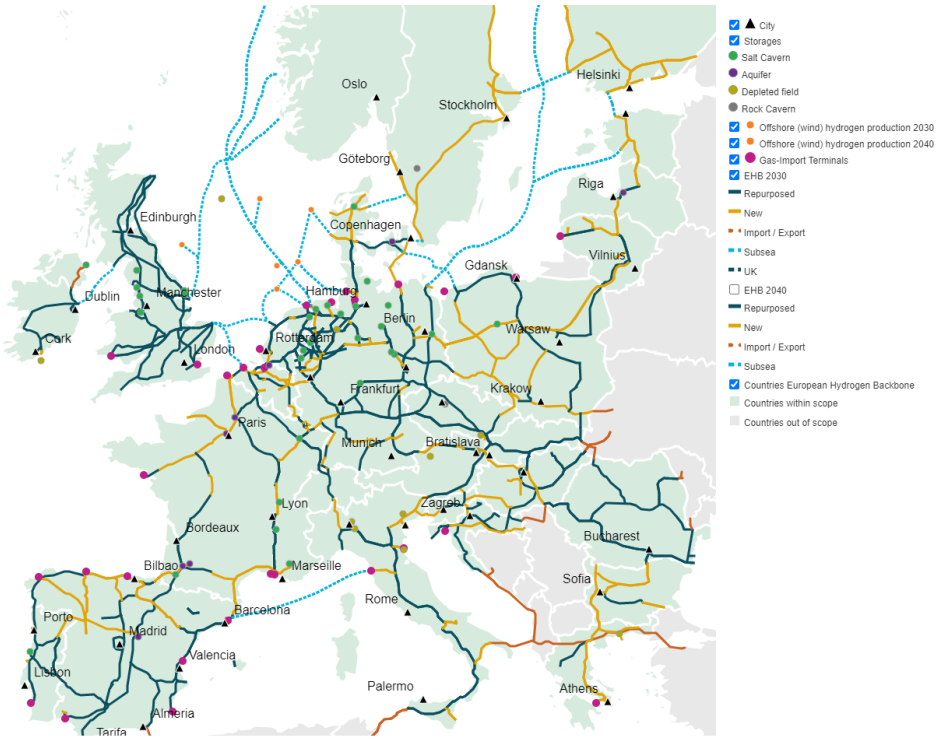


**Imagen no. 7: La red troncal europea del hidrógeno 2040.**

### 2.6.2 EJEMPLO DE REALIZACIÓN DE UNA RED NACIONAL DE HIDRÓGENO

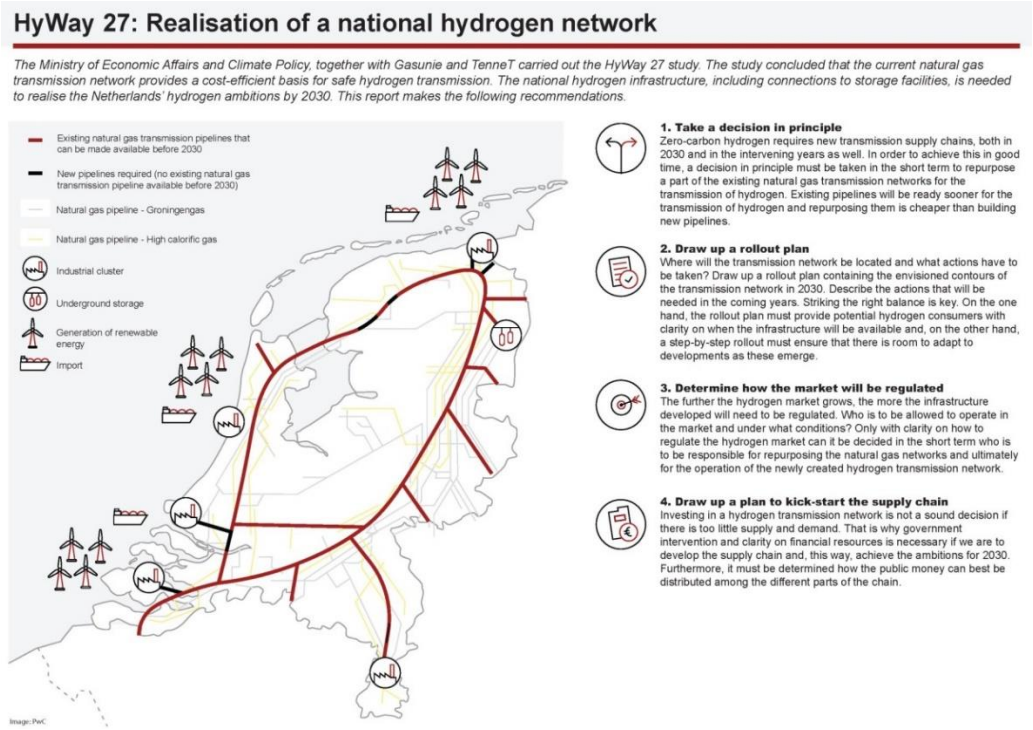


**Foto núm. 8: Infografía HyWay 27.**

## 2.7 LOHC

Los portadores orgánicos líquidos de hidrógeno (LOHC) son compuestos orgánicos que pueden absorber y liberar hidrógeno mediante reacciones químicas. Por tanto, los LOHC pueden utilizarse como medio de almacenamiento de hidrógeno. Básicamente, todos los compuestos insaturados (moléculas orgánicas con enlaces dobles o triples) pueden unir hidrógeno durante la hidrogenación.

Los LOHC son materiales capaces de almacenar hidrógeno en forma líquida, lo que puede facilitar su transporte y uso como combustible. Cuando el hidrógeno se disuelve en un LOHC, se convierte en un material de almacenamiento estable y relativamente seguro. El hidrógeno puede liberarse del LOHC calentándolo o aplicando una pequeña presión.

Se han desarrollado varios tipos diferentes de LOHC, como los basados en piridina, los basados en amina y los basados en alcohol. Estos materiales tienen propiedades diferentes y pueden ser más o menos adecuados para distintas aplicaciones.

Una de las ventajas de los LOHC es que pueden almacenar hidrógeno a densidades relativamente altas, lo que permite transportar grandes cantidades de hidrógeno en un volumen reducido. Esto podría hacerlos útiles para aplicaciones como los vehículos de pila de combustible, en los que el hidrógeno debe almacenarse a bordo del vehículo.

Las LOHC siguen siendo un campo de investigación activo y quedan muchos retos por resolver antes de que puedan utilizarse de forma generalizada. Por ejemplo, es necesario seguir trabajando para mejorar la eficacia del proceso de almacenamiento y liberación, y encontrar materiales que sean estables y seguros durante largos periodos de tiempo.

En 2020 Japón construyó la primera cadena internacional de proveedores de hidrógeno del mundo entre Brunei y la ciudad de Kawasaki. Utiliza tecnologías LOHC sobre la base de tolueno. Hyundai Motor está invirtiendo en el desarrollo de sistemas estacionarios y de a bordo LOHC.

### 2.7.1 EJEMPLO PRÁCTICO DE UTILIZACIÓN DE LA LOHC

**Tecnologías LOHC**

Hydrogenious LOHC Technologies es una empresa alemana especializada en el desarrollo de tecnología de portadores orgánicos líquidos de hidrógeno (LOHC) para el almacenamiento y transporte de hidrógeno. La tecnología LOHC de la empresa utiliza una clase especial de compuestos orgánicos llamados cicloalcanos para almacenar hidrógeno en forma líquida a temperatura y presión ambiente. El hidrógeno almacenado puede transportarse fácilmente y utilizarse como fuente de combustible para vehículos o en procesos industriales. Esta tecnología puede aumentar enormemente la eficiencia y la viabilidad del uso del hidrógeno como combustible.

**Foto núm. 9: Infraestructura LOHC estacionaria - StoragePLANTS by Hydrogenious.**

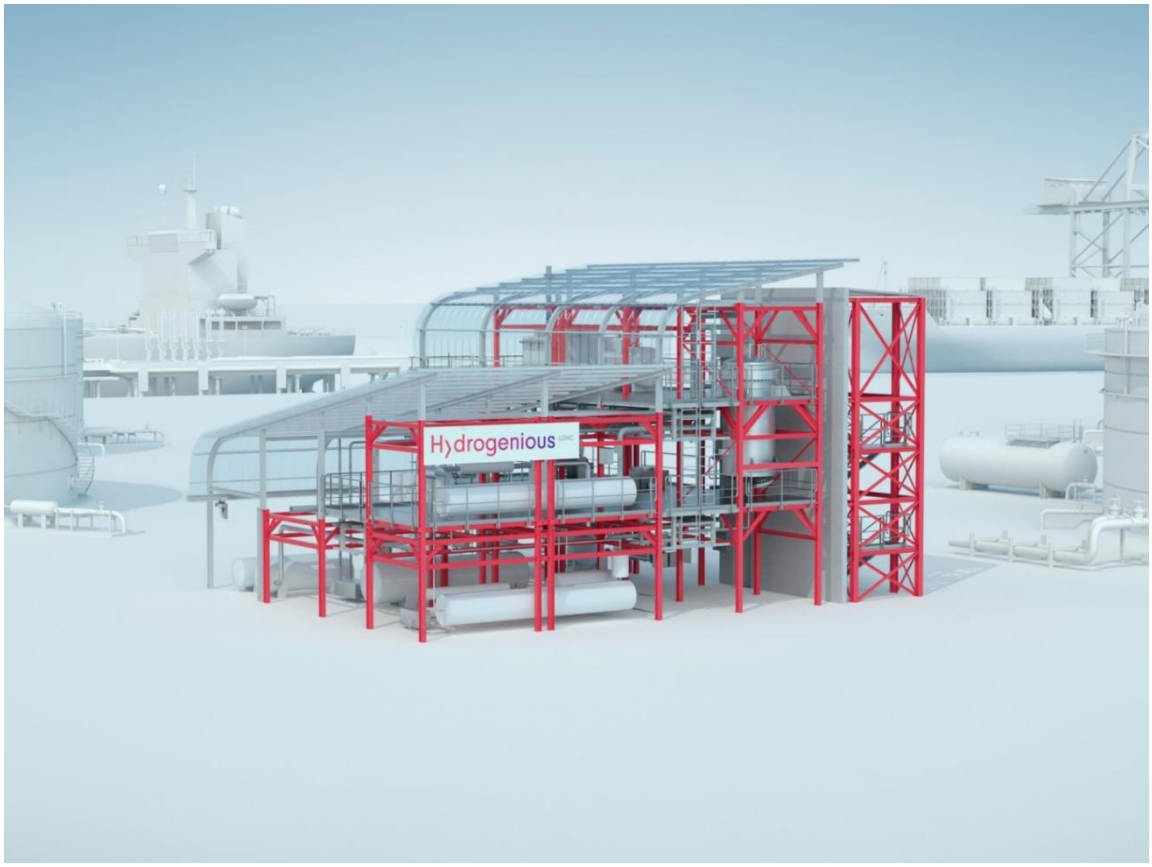


**Foto núm. 10: Infraestructura LOHC estacionaria - ReleasePLANTS by Hydrogenious.**

## RESUMEN

El hidrógeno puede transportarse en forma gaseosa o líquida.

Hidrógeno gaseoso: El hidrógeno gaseoso puede transportarse en tanques presurizados o refrigerados en buques especializados. Estos tanques están diseñados para almacenar hidrógeno a altas presiones y bajas temperaturas para minimizar el volumen del gas. El transporte marítimo de hidrógeno en estado gaseoso es relativamente nuevo y actualmente se limita a pequeñas cantidades.

Hidrógeno líquido: El hidrógeno líquido puede transportarse en tanques criogénicos en buques especializados. Estos tanques están diseñados para almacenar hidrógeno a temperaturas inferiores a -253°C y a alta presión para mantenerlo en estado líquido. El transporte marítimo de hidrógeno líquido es más habitual que el transporte de hidrógeno gaseoso, pero sigue siendo relativamente limitado debido al elevado coste de los buques especializados y de los equipos de manipulación.

Por suministro de hidrógeno se entiende el transporte y la distribución de hidrógeno desde un lugar de producción o almacenamiento hasta un punto de uso o venta. Existen varios métodos para suministrar hidrógeno, como las tuberías, los camiones cisterna, el ferrocarril y la generación in situ.

Tuberías: El hidrógeno puede transportarse por gasoductos, igual que el gas natural, pero la infraestructura actual es limitada.

Camión cisterna: El hidrógeno puede transportarse en camiones cisterna en estado gaseoso o líquido. Cuando el hidrógeno se transporta en forma líquida, debe mantenerse a una temperatura de -253°C y a alta presión para que siga siendo líquido. Esto requiere camiones cisterna y equipos de manipulación especializados.

Ferrocarril: El hidrógeno también puede transportarse por ferrocarril, ya sea en forma gaseosa o líquida. Sin embargo, el transporte ferroviario no se utiliza habitualmente para el hidrógeno debido al elevado coste de los vagones especializados y de los equipos de manipulación.

Generación in situ: En algunos casos, el hidrógeno puede producirse in situ en el punto de uso utilizando gas natural, electrólisis del agua u otros métodos. Esta puede ser una opción conveniente para los usuarios que necesitan una pequeña cantidad de hidrógeno de forma regular y se encuentran cerca de un suministro de gas natural.

Independientemente del método de suministro, el hidrógeno debe manipularse con cuidado, ya que es altamente inflamable y puede ser peligroso si no se manipula correctamente.

| Method | Advantages | Disadvantages |
|---|---|---|
| **Compressed hydrogen transportation in containers by road or rails** | - No need to build special infrastructure (pipelines)<br>- Transport capacity can be scaled well to requirements on a small scale | - High weight and volume tanks<br>- The pipeline also functions as an accumulator hydrogen storage tank<br>- Small mass transport capacity |
| **Liquified hydrogen transportation in containers by road, rail or ship** | - No need to build infrastructure (pipelines)<br>- Possibility of transporting larger volumes | - Large liquefaction losses<br>- Small mass transport capacity |
| **Hydrogen transportation by pipeline with natural gas mixture** | - Existing natural gas infrastructure (and biogas/bio-methane)<br>- Continuity of supply<br>- Lower costs compared to transport by road/rail<br>- Natural storage capacity | - A limited ratio of admixture to a certain percentage<br>- The maximum hydrogen concentration is given by compatibility of the connected end devices (e.g. CNG, boilers, etc.) |
| **Seperation of hydrogen from the natural gas mixture using membrane gas separation** | - Use of the existing pipeline network<br>- Relatively cheap technology<br>- Scalable technology | - Hydrogen back separation is not 100%<br>- Can only be used on sections without branching<br>- New technology |
| **Clean hydrogen transportation through an existing gas pipeline adjusted to clean hydrogen** | - Means to import large volumes hydrogen<br>- Flexible balancing according to immediate country needs<br>- Active transmission system operator in the latest approaches to decarbonise the EU gas sector<br>- Experience in hydrogen operation in Europe, e.g. Benelux region | - Low level of transport experience of pure hydrogen in pipelines in the region Central Europe |
| **Pure hydrogen transportation through a new constructed pipeline** | - Means of importing large volumes of hydrogen<br>- Flexible balancing according to the immediate need in the country<br>- Experience in operating hydrogen pipelines in Europe, e.g. Benelux region<br>- Importing 'cheap' hydrogen from the regions with significantly lower production costs | - High investment costs for construction compared to the use of existing infrastructure<br>- Problems with securing rights land rights, EIA, nature protection and landscape |
| **Liquid organic hydrogen carriers (LOHC)** | - Transportation at normal temperature and pressure<br>- Easy liquid handling<br>- High hydrogen content both in terms of both by weight and volume<br>- Great flexibility in terms of what is transported of quantity and distance transported | - Hydrogen storage and recovery is expensive<br>- New technology |

**Tabla no. 1: Comparación de los métodos de transporte de hidrógeno.**

## PREGUNTAS DE REPASO

1. ¿Cuáles son los métodos básicos conocidos para el transporte de hidrógeno?

2. ¿Cuál es la presión habitual en los contenedores cuando se transporta hidrógeno comprimido?

3. ¿Cuál es la temperatura del hidrógeno líquido?

4. ¿Cuál es la concentración típica de hidrógeno cuando se transporta en gasoductos de gas natural?

5. ¿Qué es la separación por membranas?

6. ¿Qué sabe sobre el proyecto europeo Hydrogen Backbone?

7. Explique qué significan las siglas LOHC.

# 3 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

## INTRODUCCIÓN

El hidrógeno puede almacenarse de varias formas, como gas, líquido o sólido. Cada método tiene sus propias ventajas e inconvenientes, y el método más apropiado para una aplicación concreta dependerá de los requisitos y limitaciones específicos de dicha aplicación.

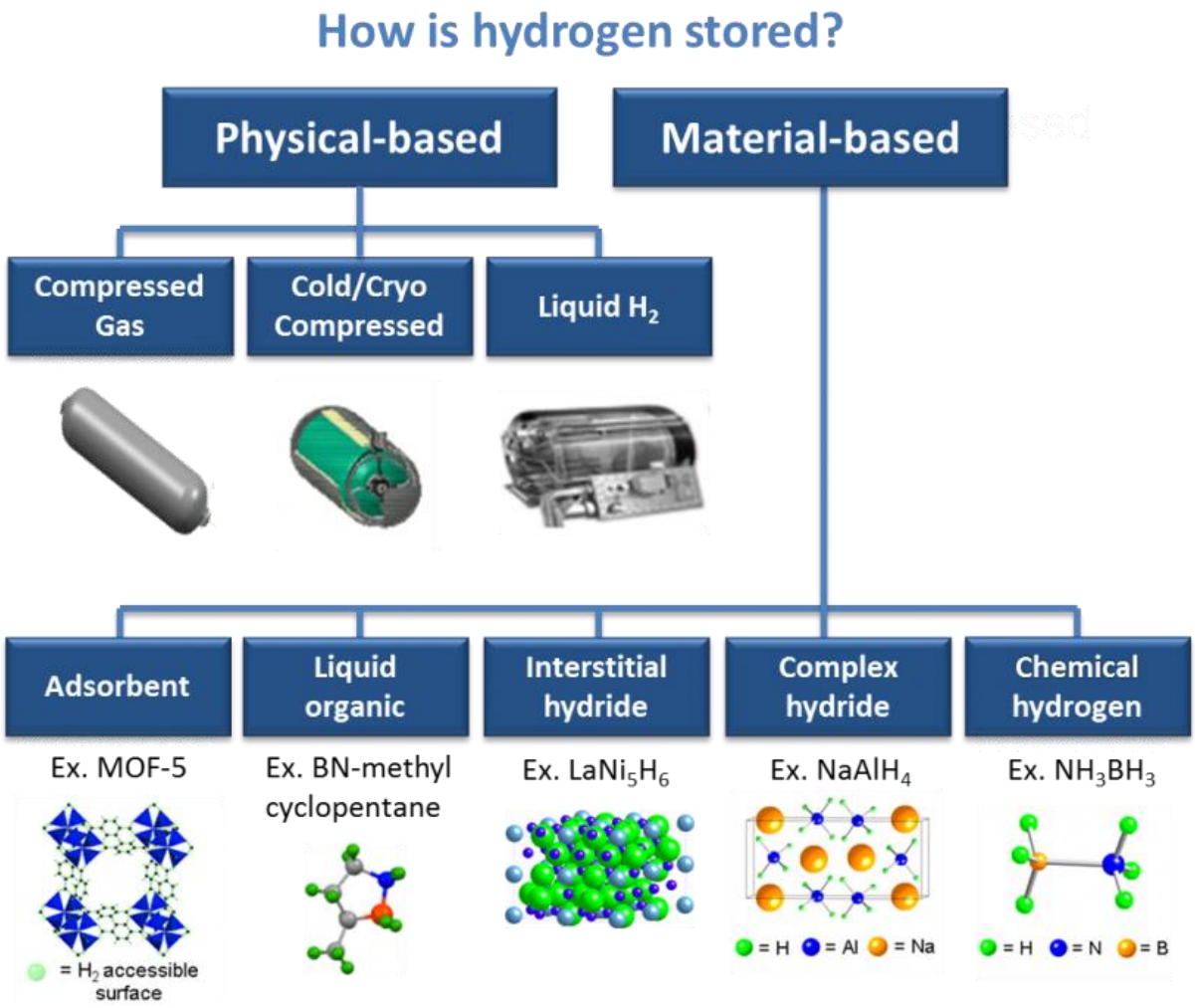


Imagen no. 11: Métodos de almacenamiento de hidrógeno.

Una forma de almacenar hidrógeno es como gas, lo que puede hacerse presurizándolo en un depósito o bombona. Se trata de un método sencillo y relativamente barato, pero la densidad de almacenamiento es relativamente baja, por lo que se necesita un gran volumen para almacenar una cantidad significativa de hidrógeno. Además, los tanques de alta presión pueden ser pesados y requerir medidas especiales de manipulación y seguridad.

Otra forma de almacenar hidrógeno es en forma líquida, lo que puede conseguirse enfriándolo a una temperatura inferior a su punto de ebullición. El hidrógeno líquido tiene una densidad de almacenamiento muy alta, por lo que es posible almacenar una gran cantidad en un volumen relativamente pequeño. Sin embargo, la temperatura criogénica del hidrógeno líquido (-253°C) requiere el uso de sistemas especializados de aislamiento y gestión térmica, que pueden resultar caros.

El hidrógeno también puede almacenarse en forma sólida, adsorbiéndolo en la superficie de un material poroso. Este método tiene la ventaja de ser relativamente sencillo y seguro, y puede alcanzar una alta densidad de almacenamiento. Sin embargo, la velocidad a la que el hidrógeno puede ser adsorbido y desorbido del material de almacenamiento puede ser lenta, lo que puede limitar la utilidad práctica de este método en algunas aplicaciones.

También existen otros métodos de almacenamiento de hidrógeno, como el almacenamiento químico y el almacenamiento de hidruros metálicos. Estos métodos implican el uso de compuestos químicos o metales que pueden reaccionar reversiblemente con el hidrógeno para formar compuestos estables, que pueden almacenarse hasta que se necesiten. Estos métodos pueden alcanzar altas densidades de almacenamiento y son relativamente seguros, pero pueden estar limitados por la velocidad a la que el hidrógeno puede ser absorbido y liberado, así como por el coste y la disponibilidad de los materiales de almacenamiento.

### PALABRAS CLAVE

Hidrógeno comprimido, depósito a presión, hidrógeno líquido, depósitos criogénicos, contenedores subterráneos, estructuras de gas, hidruros de hidrógeno, hidruros metálicos

## 3.1 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO

Debido a la baja densidad del hidrógeno, es necesario almacenarlo comprimido en depósitos a presión. Tienen que ser resistentes a la presión y a la destrucción y correctamente estancos (apretados con llave dinamométrica) para evitar fugas. El hidrógeno es el gas con la molécula más pequeña y por lo tanto es necesario utilizar materiales especiales para su almacenamiento. Cuando el hidrógeno entra en contacto con el acero virgen o el aluminio se produce la llamada fragilización por hidrógeno, que puede empeorar la durabilidad de las botellas a presión, lo que requiere de nuevo el uso de materiales especiales. El prensado del hidrógeno es muy exigente desde el punto de vista energético. El hidrógeno

es un gas que se comprime muy mal. Tiene el coeficiente Joule-Thompson invertido, por lo que se necesita mucha más energía para su compresión que con otros gases. Para el almacenamiento estacionario de hidrógeno se utilizan grandes cantidades de tanques de acero a presión o compuestos (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 81).

*El efecto Joule-Thomson, también conocido como efecto Joule-Kelvin, es el cambio de temperatura de un gas o líquido al expandirse o ser forzado a atravesar una pequeña abertura o un material poroso. Este efecto debe su nombre a James Joule y William Thomson (Lord Kelvin).*

*El efecto Joule-Thomson puede observarse cuando se permite que un gas a alta presión se expanda a través de una pequeña abertura o material poroso. A medida que el gas se expande, su temperatura disminuye. Esto se debe a que la expansión del gas realiza un trabajo en el entorno, lo que requiere energía. La energía necesaria para este trabajo se extrae de la energía interna del gas, lo que provoca un descenso de su temperatura.*

*El coeficiente Joule-Thomson es una medida del cambio de temperatura de un gas o líquido al expandirse. El coeficiente es positivo para la mayoría de los gases, lo que significa que la temperatura del gas disminuye al expandirse. Para los líquidos, el coeficiente Joule-Thomson puede ser positivo o negativo, dependiendo de las propiedades específicas del líquido.*

*El efecto Joule-Thomson tiene aplicaciones prácticas en refrigeración y aire acondicionado, así como en la industria del petróleo y el gas, donde se utiliza para medir la temperatura y la presión del gas natural en distintas fases del proceso de producción.*

Para aplicaciones estacionarias se suelen utilizar cilindros de acero sin soldaduras de bajo contenido en carbono o aleado. Se fabrican en volúmenes que van desde varios litros hasta aproximadamente 50l para aplicaciones comunes. Para aplicaciones móviles se suelen utilizar recipientes a presión de material compuesto. Se fabrican en volúmenes que van desde decenas de litros hasta aproximadamente 300l. Una presión operativa típica es de 350 bar, en las aplicaciones más nuevas es de 450 - 700 bar. En muchas aplicaciones, la forma cilíndrica se deforma ligeramente en función de las necesidades de instalación en el espacio de almacenamiento de un vehículo. Si se quiere almacenar hidrógeno en depósitos de alta presión, primero hay que comprimirlo a la presión requerida. Para comprimir el hidrógeno se utilizan principalmente compresores de pistón. La energía necesaria para la compresión del hidrógeno a 350 bares alcanza aproximadamente el 30% de la energía de un combustible (Krátky, 2012, s. 37).

Foto no. 12: Depósitos de hidrógeno a presión.

La siguiente opción de almacenamiento de hidrógeno en forma gaseosa es almacenarlo en almacenes subterráneos. Suelen ser algunas minas de sal extraídas o cuevas de gas natural y yacimientos de gas vacíos. En el mundo se utiliza este método en varios lugares, por ejemplo, en Amarillo en Texas (850 mil. $m^3$), en Beynes, Francia (330 mil. $m^3$), en Billington, Inglaterra (2,2 mil. $m^3$). Otros lugares de almacenamiento se encuentran, por ejemplo, en Alemania y Holanda (Krček, 2010, s. 20).

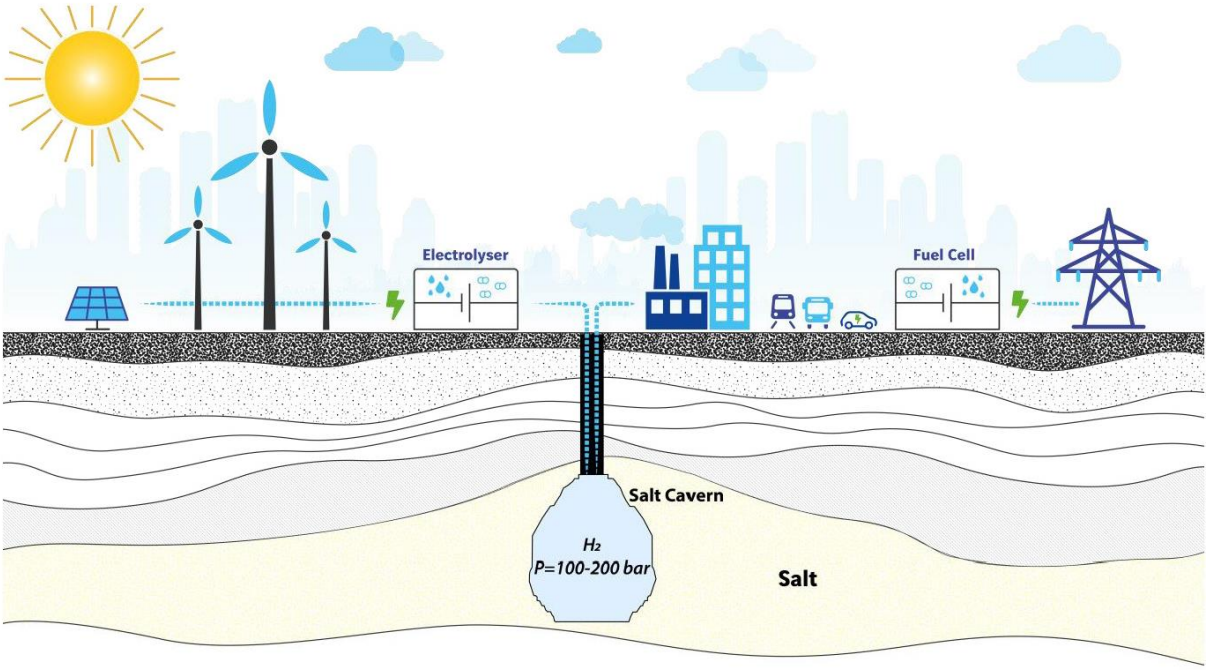


Foto núm. 13: Almacenamiento de hidrógeno en una caverna de sal.

## 3.2 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO LÍQUIDO

Hay varios factores clave que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar un sistema de almacenamiento de hidrógeno líquido.

Un factor importante es el material del depósito de almacenamiento. El depósito debe ser capaz de soportar las temperaturas extremadamente bajas del hidrógeno líquido (-253°C) y la presión que se genera en su interior al expandirse y contraerse el gas hidrógeno. El acero inoxidable y el aluminio son materiales de uso común para los depósitos de almacenamiento de hidrógeno, pero deben recibir un tratamiento especial para hacerlos resistentes a la corrosión y al agrietamiento a bajas temperaturas. El depósito también debe estar diseñado para evitar la entrada de calor, ya que esto puede hacer que el hidrógeno se vaporice y aumente la presión dentro del depósito. Esto se consigue normalmente mediante el uso de aislamiento, como espuma o paneles aislados al vacío.

Otro factor importante es el tamaño del depósito de almacenamiento. El depósito debe ser lo suficientemente grande como para contener una cantidad de hidrógeno suficiente para satisfacer las necesidades de la aplicación, pero también lo suficientemente pequeño como para resultar práctico para el uso previsto. Por ejemplo, un depósito demasiado grande puede ser demasiado pesado u ocupar demasiado espacio, mientras que un depósito demasiado pequeño puede no ser capaz de contener suficiente hidrógeno para ser práctico.

Por último, es importante tener en cuenta la seguridad del sistema de almacenamiento. El hidrógeno líquido es un gas inflamable, por lo que es importante asegurarse de que el sistema de almacenamiento está diseñado para evitar fugas o derrames, y de que está equipado con elementos de seguridad como válvulas de descarga de presión y sistemas de parada de emergencia.

Para el almacenamiento se utilizan recipientes multicapa con muy buenas propiedades de aislamiento y una sobrepresión máxima de 5 bares. Estos recipientes deben estar equipados con un mecanismo de alivio de presión que regule la sobrepresión máxima segura. Durante el almacenamiento de hidrógeno en tanques criogénicos se produce una evaporación gradual causada por la transferencia de calor desde el entorno y la presión aumenta en el interior del tanque. Para evitar la destrucción del depósito, la presión excesiva debe controlarse liberando el hidrógeno evaporado. En los depósitos utilizados habitualmente, las pérdidas pueden alcanzar hasta el 3% del contenido al día (dependiendo de la calidad del depósito). En algunas aplicaciones, el hidrógeno residual se retiene y presuriza en cilindros de presión adicionales. La licuefacción es un proceso tecnológica y energéticamente exigente (Krátky, 2012, s. 38).

La energía mínima teórica para licuar hidrógeno a partir de condiciones ambientales (300 K, 1,01 bar) es de 3,3 kWh/kg de LH2 o 3,9 kWh/kg de LH2 con conversión a para-LH2 (que es la práctica habitual). Las necesidades reales de energía para la licuefacción son sustancialmente superiores, normalmente de 10-13 kWh/kg de LH2, dependiendo del tamaño de la operación de licuefacción. Los nuevos métodos de licuefacción, como el licuefactor magnético regenerativo activo, pueden requerir tan sólo 7 kWh/kg de LH2. A título comparativo, el valor calorífico inferior (VCI) del hidrógeno es de 33,3 kWh/kg $H_2$. Los requisitos energéticos de compresión de la producción in situ oscilan aproximadamente entre el 5 y el 20% del VCI. La licuefacción (incluida la conversión a paraLH2) con los procesos actuales requiere entre el 30 y el 40% del VHL, mientras que los requisitos energéticos teóricos para 700 bar y el almacenamiento de LH2 abarcan un intervalo de sólo el 4-10% del VHL respectivamente (DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009, s. 1).

Imagen no. 14: Depósito de hidrógeno líquido.

## 3.3 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN CONTENEDORES SUBTERRÁNEOS EN UNA MEZCLA CON METANO O AMONÍACO

El hidrógeno puede almacenarse bajo tierra en contenedores en una mezcla con metano o amoníaco, un proceso conocido como "inyección de gas hidrógeno". Este método se utiliza para almacenar el exceso de hidrógeno producido en épocas de baja demanda, de modo que pueda recuperarse y utilizarse como combustible o materia prima cuando sea necesario. Este método tiene varias ventajas:

- Seguridad: La inyección de gas hidrógeno permite almacenarlo bajo tierra en un entorno controlado, lo que reduce el riesgo de fugas y accidentes.
- Eficacia: El hidrógeno puede almacenarse en altas densidades cuando se mezcla con metano o amoníaco, lo que permite almacenar más hidrógeno en un volumen menor.
- Sostenibilidad: La inyección de hidrógeno gaseoso puede contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que permite almacenar el exceso de hidrógeno y utilizarlo como combustible en lugar de liberarlo a la atmósfera.

La implantación de la inyección de hidrógeno gaseoso plantea varios retos, como la necesidad de desarrollar contenedores de almacenamiento adecuados y el coste de construcción y explotación de las instalaciones de almacenamiento. Sin embargo, este método puede desempeñar un papel importante en el futuro del almacenamiento y la distribución de hidrógeno.

La inyección de gas hidrógeno consiste en almacenar el exceso de hidrógeno en contenedores subterráneos en una mezcla con metano o amoníaco, un proceso que puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia del almacenamiento de hidrógeno. He aquí una explicación más detallada de cómo funciona este proceso:

- El hidrógeno se produce mediante diversos métodos, como la electrólisis, el reformado de metano con vapor y la gasificación de biomasa. En épocas de baja demanda, se produce un exceso de hidrógeno que debe almacenarse hasta que se necesite.
- El hidrógeno se inyecta en contenedores de almacenamiento subterráneos, donde se mezcla con metano o amoníaco. El metano o el amoníaco ayudan a aumentar la densidad de la mezcla, lo que permite almacenar más hidrógeno en un volumen menor.
- La mezcla de hidrógeno y metano se almacena bajo tierra, normalmente a varios cientos de metros de profundidad. Los contenedores de almacenamiento están diseñados para soportar las condiciones de presión y temperatura a esa profundidad.
- Cuando se necesita el hidrógeno, se recupera de los contenedores de almacenamiento y se separa del metano o del amoníaco. Esto puede hacerse mediante diversos métodos, como la adsorción por cambio de presión y la destilación criogénica.
- El hidrógeno purificado puede utilizarse como combustible o materia prima en diversas aplicaciones, como el transporte, la generación de energía y los procesos industriales.

## 3.4 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN HIDRUROS

El hidrógeno puede almacenarse en hidruros, que son materiales que pueden absorber y liberar gas hidrógeno. Existen varios tipos de hidruros: metálicos, covalentes e iónicos.

Los hidruros metálicos se forman cuando el hidrógeno gaseoso reacciona con un metal para formar un compuesto sólido. Estos compuestos tienen una gran capacidad de almacenamiento de hidrógeno, pero suelen ser pesados y voluminosos, y requieren altas presiones para liberar el hidrógeno.

Los hidruros covalentes se forman cuando los átomos de hidrógeno se enlazan covalentemente con otros átomos para formar un compuesto. Estos compuestos tienen una capacidad moderada de almacenamiento de hidrógeno y pueden liberarse a presiones más bajas que los hidruros metálicos.

Los hidruros iónicos se forman cuando los iones de hidrógeno se enlazan con otros iones para formar un compuesto. Estos compuestos tienen una gran capacidad de almacenamiento de hidrógeno, pero

en general no son tan estables como los hidruros metálicos o covalentes y tienden a descomponerse a altas temperaturas.

El uso de hidruros para el almacenamiento de hidrógeno plantea varios retos, como el coste y la dificultad de producir y manipular los hidruros, así como la escasa eficacia del proceso de liberación del hidrógeno. Los investigadores trabajan en el desarrollo de nuevos materiales y métodos para superar estas dificultades y conseguir que el almacenamiento de hidrógeno en hidruros sea más práctico y rentable.

A temperatura normal, los hidruros son estables, no se disuelven y son depósitos de hidrógeno relativamente seguros. Su desintegración se produce a altas temperaturas, en el proceso se libera hidrógeno que se lleva a una pila de combustible.

Los parámetros observados con estos sistemas son principalmente la temperatura a la que se produce la desorción del hidrógeno de un material, la capacidad de peso del absorbedor (en el caso de todo el sistema), la capacidad de volumen del absorbedor y, por último, pero no por ello menos importante, el precio y la complejidad del sistema.

Uno de los requisitos es realizar la descomposición a temperaturas ligeramente superiores (150 - 200°C) para no consumir una cantidad excesiva de energía por el calentamiento del hidruro.

Se han diseñado sistemas eficaces capaces de absorber grandes cantidades de hidrógeno. Con diferentes tipos de hidruros, hay diferentes cantidades de hidrógeno que los materiales pueden absorber. Algunos hidruros son líquidos fácilmente procesables a temperatura ambiente y presión atmosférica, otros son sustancias firmes.

Estos materiales tienen una buena densidad energética volumétrica, pero con respecto a su peso su densidad energética no es la ideal. Sin embargo, por ejemplo, para algunos compuestos con metales ligeros, como el magnesio, el peso total del sistema resulta sólo un 30% superior en comparación con los sistemas de almacenamiento de hidrógeno licuado. Estos parámetros desfavorables se ven compensados por una mayor necesidad de desorción térmica a alta temperatura, baja presión del hidrógeno producido y, por último, un precio elevado de los hidruros.

Otra cualidad importante es la reversibilidad, es decir, la capacidad de un material para reabsorber nuevo hidrógeno después de haber agotado el hidrógeno almacenado. Esto está relacionado con la "recarga" de los hidruros y su uso repetido, al igual que ocurre con las pilas (Krátky, 2012, s. 41).

### 3.4.1 METAL HYDRI DES

El hidrógeno puede almacenarse en hidruros metálicos, que son compuestos formados entre hidrógeno y un metal. El hidrógeno se almacena dentro de la red metálica y puede liberarse mediante un proceso denominado deshidrogenación, que consiste en calentar el hidruro metálico a una temperatura elevada. Hay varios tipos de hidruros metálicos que pueden utilizarse para almacenar hidrógeno, como los compuestos intermetálicos, los hidruros metálicos complejos y los hidruros metálicos simples.

Los compuestos intermetálicos se forman entre dos o más metales y pueden almacenar una gran cantidad de hidrógeno en su red. Suelen ser estables y pueden utilizarse para almacenar hidrógeno a largo plazo. Sin embargo, suelen requerir altas presiones o temperaturas para liberar el hidrógeno, lo que puede resultar difícil de conseguir en aplicaciones prácticas.

Los hidruros metálicos complejos se forman entre un metal y un no metal y pueden almacenar una cantidad moderada de hidrógeno en su red. Suelen liberar el hidrógeno a temperaturas más bajas que los compuestos intermetálicos, pero no son tan estables y pueden descomponerse con el tiempo.

Los hidruros metálicos simples, como el hidruro de magnesio, pueden almacenar una pequeña cantidad de hidrógeno en su red y liberarlo a bajas temperaturas. Sin embargo, no son tan estables como los compuestos intermetálicos y tienden a descomponerse con el tiempo.

En general, los hidruros metálicos son una opción prometedora para el almacenamiento de hidrógeno debido a su gran capacidad de almacenamiento y a la posibilidad de liberar el hidrógeno a temperaturas relativamente bajas. Sin embargo, es necesario seguir investigando para mejorar su estabilidad y reducir el coste de su producción.

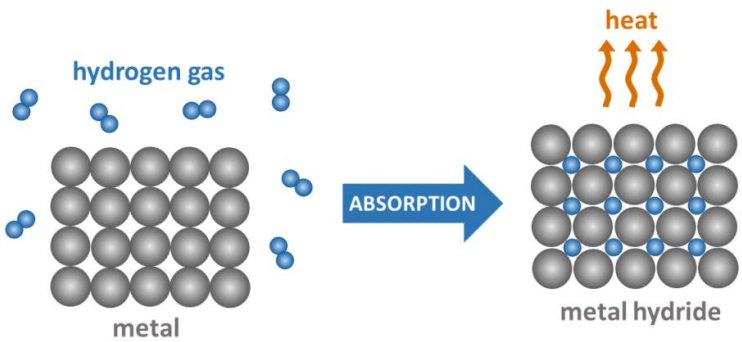


**Imagen no. 15: Reacción exotérmica de absorción de hidrógeno.**

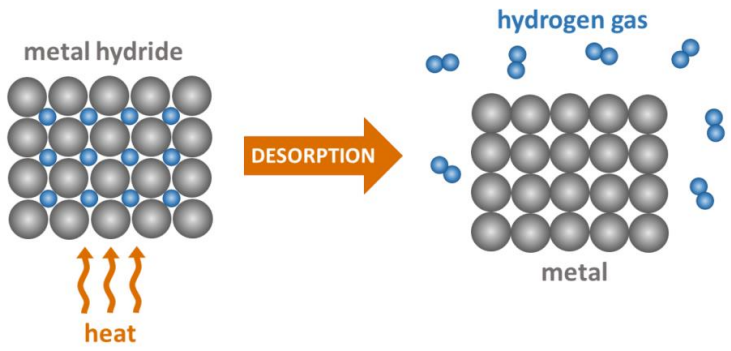


Imagen no. 16: Reacción de desorción de hidrógeno a partir de hidruro de metal.

## 3.5 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN RECIPIENTES DE CARBONO

Los materiales de carbono, como el grafeno y los nanotubos de carbono, se han estudiado como medio para almacenar hidrógeno. Estos materiales tienen una gran superficie y pueden absorber físicamente el gas hidrógeno, lo que les permite almacenar grandes cantidades de hidrógeno en un pequeño volumen. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento de hidrógeno de estos materiales está limitada por su superficie y el tamaño de sus poros, y sólo pueden almacenar pequeñas cantidades de hidrógeno a la vez. Además, el proceso de absorción y liberación de hidrógeno de estos materiales puede ser lento, lo que los hace menos prácticos para su uso en aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno.

Existen varias formas de almacenar hidrógeno en materiales de carbono, como la adsorción física, la adsorción química y la reacción química.

La adsorción física se produce cuando las moléculas de hidrógeno son atraídas por la superficie del material de carbono debido a las fuerzas de Van der Waals. Este tipo de almacenamiento de hidrógeno es reversible, lo que significa que el hidrógeno puede liberarse fácilmente del material reduciendo la presión o aumentando la temperatura. La adsorción física puede utilizarse para almacenar hidrógeno a altas presiones (hasta unos 35 MPa) y a temperatura ambiente, pero la capacidad de almacenamiento está limitada por la superficie del material.

*Las fuerzas de Van der Waals son fuerzas de atracción débiles que surgen entre átomos y moléculas neutros. Son un tipo de interacción no covalente y están causadas por fluctuaciones temporales de la*

*densidad electrónica. Los tres tipos de fuerzas de Van der Waals son las fuerzas de dispersión de London, las interacciones dipolo-dipolo y las interacciones cuadrupolo-cuadrupolo. Estas fuerzas son responsables del comportamiento de gases y líquidos y también intervienen en la estabilidad de biomoléculas y la formación de cristales.*

La adsorción química implica la formación de un enlace químico entre el hidrógeno y el material de carbono. Este tipo de almacenamiento de hidrógeno también es reversible, pero el enlace es más fuerte que las fuerzas de van der Waals que intervienen en la adsorción física, por lo que se necesita más energía para liberar el hidrógeno. La adsorción química puede utilizarse para almacenar hidrógeno a presiones más bajas (inferiores a 10 MPa) y a temperaturas más bajas.

La reacción química implica la formación de un nuevo compuesto mediante la reacción del hidrógeno con el material de carbono. Este tipo de almacenamiento de hidrógeno no es reversible y el hidrógeno no puede liberarse fácilmente del material. Sin embargo, la reacción química puede utilizarse para almacenar grandes cantidades de hidrógeno en un volumen reducido.

En general, los materiales de carbono tienen varias propiedades atractivas para el almacenamiento de hidrógeno, como su elevada superficie, su gran resistencia y su bajo peso. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento de estos materiales es limitada y el proceso de absorción y liberación de hidrógeno puede ser lento, lo que los hace menos prácticos para su uso en muchas aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno.

Las nanoestructuras de carbono incluyen el grafito altamente poroso y los nanotubos de carbono. Recientemente, la atención se ha centrado en el estudio de los nanotubos de pared simple, que tienen un gran potencial para el almacenamiento de hidrógeno. Muchos equipos de investigación de todo el mundo trabajan en este tema.

El elemento elemental de construcción de los nanotubos es el grafito. Los nanotubos están formados por una o varias capas enrolladas en el tubo de una longitud final. El diámetro de los tubos es de 0,7 - 3nm (Krček, 2010, s. 22).

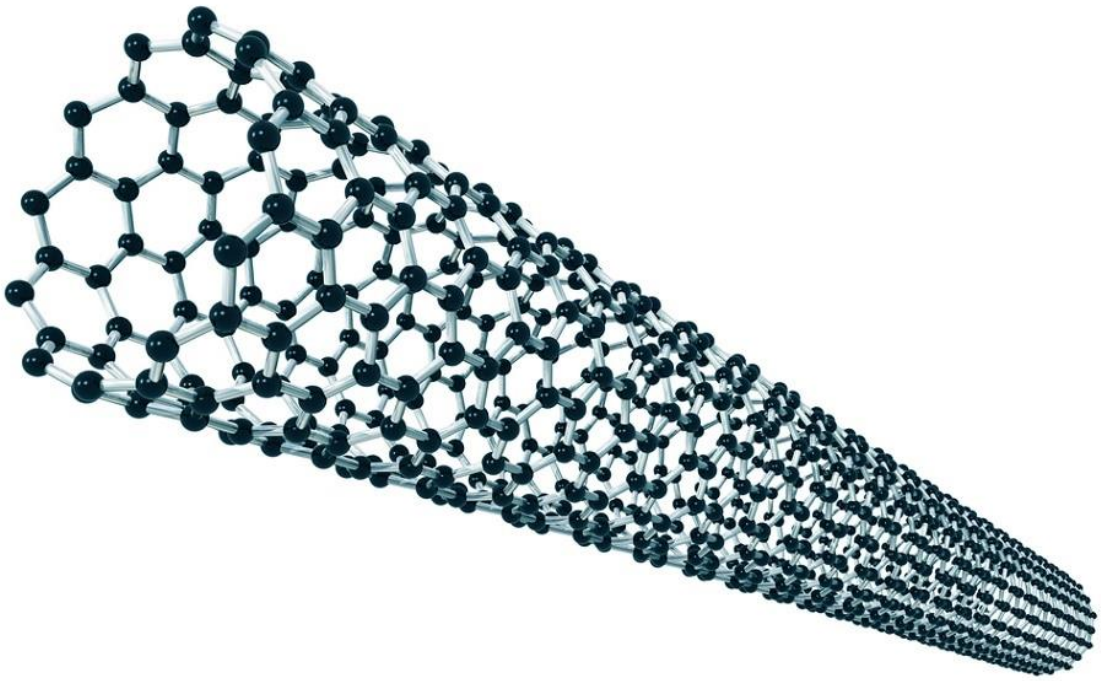

Imagen núm. 17: Nanotubos de carbono.

## RESUMEN

El almacenamiento de hidrógeno comprimido se refiere al almacenamiento de gas hidrógeno a altas presiones para reducir el volumen que ocupa. Esto puede hacerse de diferentes maneras, incluido el uso de tanques o cilindros de alta presión.

El almacenamiento de hidrógeno comprimido es que permite almacenar una cantidad relativamente grande de hidrógeno en un espacio relativamente pequeño. Esto lo convierte en una opción atractiva para su uso en vehículos y otras aplicaciones en las que el espacio es escaso. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las altas presiones requeridas para el almacenamiento de hidrógeno comprimido pueden plantear riesgos de seguridad, y los tanques y cilindros utilizados para almacenar el gas deben ser cuidadosamente diseñados y mantenidos para minimizar estos riesgos.

El almacenamiento de hidrógeno líquido se refiere al almacenamiento de hidrógeno en su forma líquida, en lugar de como gas o sólido. Para almacenar hidrógeno en estado líquido, debe enfriarse a una temperatura de unos -253 °C, muy por debajo de su punto de ebullición.

El almacenamiento de hidrógeno líquido es que permite almacenar una gran cantidad de hidrógeno en un volumen relativamente pequeño. Esto lo convierte en una opción atractiva para diversas aplicaciones, como los viajes espaciales, donde el peso y el volumen son consideraciones críticas.

La baja temperatura necesaria para el almacenamiento del hidrógeno líquido dificulta su manipulación y transporte, y requiere equipos especializados y aislamiento para evitar la transferencia de calor y la evaporación. Además, la baja temperatura del hidrógeno líquido puede hacerlo propenso a la fragilización de ciertos materiales, lo que puede causar problemas en los tanques y otros recipientes de almacenamiento.

Es posible almacenar hidrógeno en contenedores subterráneos en una mezcla con metano o amoníaco, proceso conocido como "mezcla de hidrógeno". Este enfoque puede utilizarse potencialmente para almacenar el exceso de hidrógeno que se produce a partir de fuentes de energía renovables, como la eólica o la solar, y luego mezclarlo con gas natural para utilizarlo como combustible.

La mezcla de hidrógeno es que permite almacenar y transportar el hidrógeno utilizando las infraestructuras existentes, como los gasoductos de gas natural. Esto puede resultar más rentable y logísticamente más sencillo que construir nuevas infraestructuras específicas para el almacenamiento y el transporte de hidrógeno.

Uno de los principales problemas es que el hidrógeno y el metano o el amoníaco tienen propiedades físicas y químicas diferentes, lo que puede dificultar su mezcla segura y eficaz. Además, la producción de hidrógeno es más cara que la de metano, por lo que la economía de la mezcla de hidrógeno no siempre es favorable.

El almacenamiento de hidrógeno en hidruros se refiere al uso de materiales que pueden absorber y liberar grandes cantidades de hidrógeno, conocidos como "hidruros", como forma de almacenar hidrógeno. Existen varios tipos de hidruros que pueden utilizarse para el almacenamiento de hidrógeno, como los hidruros metálicos, los hidruros químicos y los hidruros complejos.

La principal ventaja del almacenamiento de hidrógeno en hidruros es que permite almacenarlo de forma relativamente compacta y ligera. Esto lo convierte en una opción atractiva para su uso en diversas aplicaciones, como dispositivos electrónicos portátiles y vehículos de pila de combustible.

Los hidruros tienen una capacidad relativamente baja de almacenamiento de hidrógeno, lo que significa que se necesita un gran volumen de material para almacenar una cantidad práctica de

hidrógeno. Además, el proceso de absorción y liberación de hidrógeno de los hidruros suele ser lento y requiere el uso de calor, lo que puede requerir mucha energía y ser ineficiente.

El almacenamiento de hidrógeno en contenedores basados en carbono se refiere al uso de materiales hechos de carbono, como los nanotubos de carbono o el grafeno, como forma de almacenar hidrógeno. Estos materiales son conocidos por su gran superficie y sus fuertes enlaces químicos, que los hacen capaces de adsorber y almacenar grandes cantidades de hidrógeno.

Una de las principales ventajas del almacenamiento de hidrógeno en recipientes a base de carbono es que tienen una gran capacidad de almacenamiento de hidrógeno, lo que significa que se necesita un volumen relativamente pequeño del material para almacenar una cantidad práctica de hidrógeno. Además, los materiales a base de carbono son relativamente ligeros y resistentes, lo que los hace adecuados para su uso en diversas aplicaciones.

| Method | Advantages | Disadvantages |
|---|---|---|
| **Compressed hydrogen storage** | - Compared to batteries, an increasingly convenient form of energy storage for longer periods | - Losses (leakages) |
| | - Long-term experience | - Hydrogen compression is energy intensive |
| | | - Technologically no longer practically possible further improvements |
| | | - Restriction of routes according to ADR conditions |
| **Liquid hydrogen storage** | - Higher energy concentration than for compressed hydrogen | - Losses (leakages) |
| | - Can be handled at low pressure | - Liquefaction of hydrogen is energetically intensive |
| | - Good energy content ratio to the weight of the container | - Cryogenic storage vessels and transport are very expensive |
| **Hydrogen storage in underground containers in a mixture with methane or ammonia** | - High-capacity storage | - Storage of a higher proportion of hydrogen is needs to be technically verified and may vary from tank to tank |
| | - Existing storage infrastructure | - Losses (leakages) from storage of higher concentrations of hydrogen mixed with methane or hydrogen alone |
| | - Connection to the gas system | |
| | - Experience with hydrogen storage as a component of luminescent gas | |
| **Hydrogen storage in hydrides** | - Transportation at normal temperature and pressure | - New technology |
| | - Easy handling of solids | |
| | - High hydrogen content both in terms by weight and volume | |
| | - Great flexibility in terms of quantity transported and distance transported | |
| **Hydrogen storage in carbon-based containers** | - Very lightweight material | - Carbon materials are not completely impermeable to hydrogen |
| | - High strength-to-weight ratio | - Degrade over time |
| | - Chemically and thermally stable | - More expensive and technically difficult to manufacture |

**Tabla nº 2: Comparación de los métodos de almacenamiento de hidrógeno.**

## PREGUNTAS DE REPASO

1. Explique el efecto Joule-Thomson.

2. ¿Cuál es la presión típica en los tanques de almacenamiento de hidrógeno a alta presión?

3. ¿Con qué mecanismo deben estar equipados los tanques para almacenar hidrógeno líquido?

4. Describa las ventajas de almacenar hidrógeno en depósitos subterráneos mezclado con metano o amoníaco.

5. Qué tipos de hidruros son adecuados para el almacenamiento de hidrógeno.

6. ¿Qué materiales de carbono son adecuados para el almacenamiento de hidrógeno?

# 4 COMPONENTES

## INTRODUCCIÓN

Existen varias formas de almacenar hidrógeno, dependiendo del tipo y de las condiciones de presión y temperatura deseadas. Algunos componentes habituales para almacenar hidrógeno son:

- Bombonas de hidrógeno comprimido: Son recipientes de alta presión fabricados en acero, aluminio o materiales compuestos. Se utilizan para almacenar hidrógeno comprimido en estado líquido o gaseoso.
- Depósitos criogénicos: Estos tanques se utilizan para almacenar gases en estado criogénico (a muy baja temperatura), como hidrógeno líquido u oxígeno líquido.
- Tanques de almacenamiento de alta presión: Son grandes tanques que se utilizan para almacenar gases a alta presión. Pueden ser de acero, aluminio u otros materiales y suelen utilizarse para almacenar hidrógeno en estado gaseoso.
- Almacenamiento en gasoductos: El hidrógeno también puede almacenarse en tuberías, que se utilizan para transportar el gas de un lugar a otro. Estas tuberías suelen estar enterradas y pueden utilizarse para almacenar gases durante largos periodos de tiempo.

Es importante seguir los procedimientos y normas de seguridad adecuados al almacenar hidrógeno para minimizar el riesgo de accidentes o fugas.

## PALABRAS CLAVE

Cilindros comprimidos, tanques criogénicos, tanques de almacenamiento de alta presión, recipientes a presión

## 4.1 DEPÓSITOS A PRESIÓN

Los depósitos de hidrógeno a presión son recipientes diseñados para almacenar gas hidrógeno a alta presión. Suelen estar fabricados con materiales compuestos, como fibra de carbono o fibra de vidrio, que son ligeros y lo bastante resistentes para soportar la presión del gas dentro del depósito.

El gas hidrógeno se almacena en depósitos a presión para aumentar la cantidad de gas que puede almacenarse en un volumen determinado. Cuando el hidrógeno se almacena a alta presión, su densidad energética aumenta, lo que le permite ocupar mucho menos espacio. Esto hace posible almacenar grandes cantidades de hidrógeno en un depósito relativamente pequeño, lo que lo convierte en una opción atractiva para su uso en vehículos de pila de combustible y otras aplicaciones en las que el espacio es limitado.

Existen varios tipos de depósitos de hidrógeno a presión, incluidos los diseñados para ser rellenados y los diseñados para ser eliminados una vez vaciados. Algunos depósitos también están diseñados para utilizarse en combinación con otros tipos de sistemas de almacenamiento, como los depósitos criogénicos, que se utilizan para almacenar hidrógeno en forma líquida a temperaturas muy bajas.

Para garantizar la seguridad del gas dentro del depósito, los depósitos de hidrógeno a presión están equipados con diversos dispositivos de seguridad, como válvulas de descarga de presión y discos de ruptura. Estas características ayudan a evitar que el depósito se rompa o estalle en caso de que se produzca una situación de sobrepresión.

En general, los depósitos de hidrógeno a presión son una parte importante de la infraestructura necesaria para almacenar y transportar el gas hidrógeno, y desempeñan un papel fundamental en el desarrollo y despliegue de las tecnologías de pilas de combustible de hidrógeno.

Los recipientes a presión pueden utilizarse tanto para el almacenamiento estacionario como para el almacenamiento móvil de hidrógeno. Para aplicaciones estáticas, se suelen utilizar botellas de acero sin soldadura fabricadas con acero de bajo contenido en carbono o acero aleado. Se fabrican en una amplia gama de volúmenes en función del uso previsto.

En las aplicaciones móviles se suelen utilizar recipientes a presión compuestos. Se fabrican en volúmenes que van desde decenas de litros hasta aproximadamente 300 l. Una presión de

funcionamiento típica es de 350 bar, en las aplicaciones más recientes de 450 hasta 700 bar (el límite tecnológico temporal es de 1000 bar).

Los cilindros de 12 metros de longitud con un diámetro exterior de aproximadamente 80 cm pueden utilizarse como depósitos para estaciones de servicio de vehículos alimentados con hidrógeno o como depósitos para excedentes energéticos procedentes de energías renovables (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 111).

El hecho de que se trate de una tecnología probada, verificada y que cumple todos los requisitos crecientes sobre almacenamiento de hidrógeno se considera una ventaja. Es adecuada para el almacenamiento de cantidades a baja escala en suministros irregulares. Con el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno, las condiciones de almacenamiento del hidrógeno van a aumentar drásticamente. Cabe preguntarse si la evolución actual de las tecnologías no provocará una disminución de las necesidades de almacenamiento y transporte de hidrógeno a alta presión. Una desventaja de los depósitos a presión pueden ser sus aspectos de seguridad y los límites tecnológicos como, por ejemplo, la presión, el material o el volumen de los cilindros a presión (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 111-112).

Foto no. 18: Depósito de presión compuesto.

## 4.2 DEPÓSITOS CRIOGÉNICOS

Los depósitos criogénicos son recipientes de almacenamiento especialmente diseñados para almacenar materiales a temperaturas extremadamente bajas. Se utilizan para almacenar diversos materiales, incluidos gases como hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, así como materiales biológicos como células y tejidos humanos.

Los depósitos criogénicos están fabricados con materiales capaces de soportar estas temperaturas extremadamente bajas, como el acero inoxidable o el aluminio. También están fuertemente aislados para mantener el frío dentro y el calor fuera.

Existen dos tipos principales de tanques criogénicos: los tanques estacionarios y los tanques portátiles. Los tanques estacionarios se utilizan para almacenar grandes cantidades de materiales y suelen instalarse en un lugar fijo, mientras que los tanques portátiles se utilizan para almacenar cantidades más pequeñas y pueden trasladarse de un lugar a otro.

Los depósitos criogénicos se utilizan en diversos sectores, como el médico, el químico y el energético. Son una herramienta importante para almacenar y transportar materiales a temperaturas extremadamente bajas, y desempeñan un papel vital en muchas aplicaciones científicas y tecnológicas.

Los depósitos criogénicos pueden utilizarse para almacenar hidrógeno en su forma líquida, a una temperatura de -253°C. Esta es una de las formas más eficientes de almacenar hidrógeno, ya que permite un almacenamiento mucho más denso del gas.

Sin embargo, el almacenamiento de hidrógeno en un tanque criogénico requiere un equipo especial y una manipulación cuidadosa, ya que la temperatura extremadamente baja puede ser peligrosa. El depósito debe estar muy aislado para mantener el hidrógeno frío y evitar que se caliente y se vaporice. Además, el depósito debe estar equipado con dispositivos de seguridad, como válvulas de alivio de presión, para evitar que se rompa por sobrepresión.

Los depósitos criogénicos se utilizan normalmente para almacenar grandes cantidades de hidrógeno y suelen instalarse en una ubicación fija. Suelen utilizarse en las industrias química y energética, así como en entornos de investigación y desarrollo.

En general, los tanques criogénicos son una herramienta importante para almacenar y transportar hidrógeno, pero requieren una manipulación y unos equipos especiales debido a la temperatura y la presión extremas que conllevan.

**Foto núm. 19: Tanques criogénicos.**

## 4.3 DEPÓSITOS DE ALTA PRESIÓN

Los tanques de almacenamiento de alta presión son grandes recipientes a presión que se utilizan para almacenar gases a altas presiones. Pueden estar hechos de diversos materiales, como acero, aluminio y plásticos reforzados con fibra, y están diseñados para ser resistentes pero ligeros. Suelen utilizarse para almacenar gases en estado gaseoso, como el hidrógeno.

Los tanques de almacenamiento de alta presión se utilizan en diversas aplicaciones, incluido el almacenamiento de combustible para vehículos de hidrógeno. Por lo general, se diseñan y construyen para cumplir las normas y reglamentos de seguridad y minimizar así el riesgo de accidentes o fugas del gas almacenado.

Es importante seguir los procedimientos de seguridad adecuados al manipular y almacenar tanques de almacenamiento de alta presión. Esto incluye garantizar que los tanques se almacenan en un lugar seguro, lejos de fuentes de ignición, y que se manipulan y transportan con cuidado para evitar daños. Además, es importante inspeccionar y mantener periódicamente los tanques de almacenamiento de alta presión para garantizar que estén en buenas condiciones de funcionamiento y evitar fugas u otros problemas.

El almacenamiento a alta presión puede almacenar una gran cantidad de hidrógeno en un espacio relativamente pequeño. Una gran oportunidad para el almacenamiento a alta presión es la zona estratégica absolutamente necesaria para el desarrollo ulterior del hidrógeno y el ahorro resultante de la amplitud del posible almacenamiento de hidrógeno. Durante la construcción de instalaciones de almacenamiento a alta presión, es necesario contar con elevados requisitos de inversión inicial. La construcción sólo merece la pena en el punto de producción o consumo y está condicionada por la compresión del hidrógeno y la pérdida de energía. Tampoco pueden descuidarse los aspectos de seguridad (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 115).

## RESUMEN

Las botellas de hidrógeno comprimido son recipientes de alta presión utilizados para almacenar gas hidrógeno a presiones que oscilan entre 350 y 700 bares. Están fabricados con materiales de alta resistencia, como acero o materiales compuestos, y diseñados para ser resistentes pero ligeros. Se suelen utilizar como combustible para vehículos de hidrógeno, como materia prima química y para otras aplicaciones industriales y comerciales.

Los depósitos criogénicos de hidrógeno son recipientes de almacenamiento que se utilizan para almacenar hidrógeno gaseoso a temperaturas extremadamente bajas, normalmente del orden de -253 °C o más frías. Estos depósitos están fabricados con materiales que pueden soportar el frío extremo y la presión del hidrógeno almacenado, como el acero inoxidable o compuestos de alta resistencia.

Los depósitos de hidrógeno de alta presión son recipientes a presión que se utilizan para almacenar hidrógeno gaseoso a altas presiones. Están fabricados con materiales de alta resistencia, como acero o materiales compuestos, y diseñados para ser resistentes pero ligeros. Se suelen utilizar como combustible para vehículos de hidrógeno, como materia prima química y para otras aplicaciones industriales y comerciales.

Los depósitos de hidrógeno de alta presión tienen varias ventajas sobre otros tipos de almacenamiento de combustible. Son relativamente ligeros, lo que los hace idóneos para su uso en vehículos. También son fáciles de rellenar y pueden utilizarse en una amplia gama de temperaturas. Sin embargo, el hidrógeno es un gas altamente inflamable, por lo que es importante seguir los procedimientos de seguridad adecuados al manipular y almacenar depósitos de hidrógeno a alta presión. Esto incluye asegurarse de que los depósitos se almacenan en un lugar seguro, lejos de fuentes de ignición, y de que se manipulan y transportan con cuidado para evitar daños.

### PREGUNTAS DE REPASO

1. ¿Qué componentes conoce para el almacenamiento de hidrógeno?

2. ¿Cuál es la diferencia entre un recipiente a presión y un tanque criogénico?

3. ¿Dónde se utiliza con más frecuencia el almacenamiento de hidrógeno a alta presión?

# 5 LISTA DE FUENTES

- GUPTA B. Ram. *Combustible de Hidrógeno, Producción, Transporte y Almacenamiento*. CRC Press, Nueva York 2009. 611 str. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- *Vodíková strategie České republiky*. Česká republika: Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, 2021.
- ŠVÁB, Michal. *Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice*. Česká republika: Česká energetická agentura, 2006.
- KRČEK, Martin y Lukáš RADIL. *Analýza využití vodíku v energetice: Análisis del uso del hidrógeno en el suministro de energía.* Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
- BŘOUŠEK, L. *Vodík a automobil*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 51 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
- KRÁTKÝ, Š. *Výroba a uskladnění vodíku.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.
- JUREČKA, R. *Možnosti využití vodíku v letectví.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 98 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.
- GALÍK, Tomáš. *Posouzení dopadů využívání zemního plynu obohaceného vodíkem* [en línea]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132166. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.
- *Informe sobre la red troncal europea del hidrógeno* [en línea]. 2020 [cit. 2022-9-8]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjOxautrtHvAhXGu6QKHWpnDMgQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2F www.gasunie.nl%2Fen%2Fnews%2Fgas-infrastructure-companies-present-aeuropean-hydrogen-backboneplan%2F%245741%2F%245742&usg=AOvVaw2HDAt_6gG1ZBmw_EUMdh9s
- El futuro de la separación de gases mediante tecnologías de membrana [foto]. *Monteco* [en línea]. 9.5.2017 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://monteco.com/the-future-of-gas-separation-through-membrane-technologies/
- Infraestructura estacionaria del LOHC [foto]. *LOHC hidrogenioso [*en línea]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://hydrogenious.net/what/
- SATYAPAL, Sunita. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record [foto]. *Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs* [en línea]. 26.10.2009 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z:

https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf

- Instituto de investigación sobre hidruros metálicos [foto]. *Hystorsys* [en línea]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.hystorsys.no/our-story/
- Nanotubos de carbono para aplicaciones de almacenamiento de energía [foto]. *AZONANO* [en línea]. 21.10.2016 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4298
- Almacenamiento de hidrógeno: Oficina de Tecnologías del Hidrógeno y las Pilas de Combustible [foto]. *ENERGY.GOV* [en línea]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage
- Realización de una red nacional de hidrógeno [foto]. *HyWay 27* [en línea]. 30.7.2021 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.hyway27.nl/en/latest-news/hyway-27-realisation-of-a-national-hydrogen-network
- *Conferencia 3 Almacenamiento de hidrógeno: Programa europeo de formación de formadores para respondedores* [en línea]. HyResponder, 2021 [cit. 2023-01-16].
- El hidrógeno líquido se considera el "santo grial" de la adopción del hidrógeno en el sector de la movilidad: Linde COO. *S&P Global Commodity Insights* [en línea]. 16.11.2021 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/111621-liquid-hydrogen-seen-as-holy-grail-for-hydrogen-uptake-in-mobility-sector-linde-coo

# 6 LISTA DE IMÁGENES Y CUADROS

Tabla no. 1: Comparación de los métodos de transporte de hidrógeno.

Tabla nº 2: Comparación de los métodos de almacenamiento de hidrógeno.

Foto núm. 1: Panel de advertencia

Foto nº 2: Transporte de hidrógeno en contenedores por carretera

Imagen no. 3: Transporte de hidrógeno licuado en buque portacontenedores

Imagen no. 4: Separación de gases por membrana

Foto núm. 5: Transporte de hidrógeno por tuberías

Imagen no. 6: La red troncal europea del hidrógeno 2030

Imagen no. 7: La red troncal europea del hidrógeno 2040

Foto núm. 8: Infografía de HyWay 27

Imagen no. 9: Infraestructura LOHC estacionaria - StoragePLANTS by Hydrogenious

Foto núm. 10: Infraestructura LOHC estacionaria - ReleasePLANTS by Hydrogenious

Foto núm. 11: Métodos de almacenamiento del hidrógeno

Foto no. 12: Depósitos de hidrógeno a presión

Foto núm. 13: Almacenamiento de hidrógeno en una caverna de sal

Foto núm. 14: Depósito de hidrógeno líquido

Imagen no. 15: Reacción exotérmica de absorción de hidrógeno

Imagen no. 16: Reacción de desorción de hidrógeno del hidruro de matal

Foto núm. 17: Nanotubos de carbono

Foto núm. 18: Depósito de presión compuesto

Foto núm. 19: Tanques criogénicos

# 7 LISTA DE ABREVIATURAS

EHB - La red troncal europea del hidrógeno

MIE - Energía mínima de ignición

GNL: gas natural licuado

LOHC - portadores orgánicos líquidos de hidrógeno

LH2 - hidrógeno líquido

HENG: gas natural enriquecido con hidrógeno

$CO_2$ - dióxido de carbono

GNC: gas natural comprimido

MOF: marcos orgánicos metálicos

UE - Unión Europea

UK - Reino Unido

EIA: evaluación del impacto ambiental

LHV - valor calorífico inferior

DOE - diseño de experimentos

ADR - accord dangereuses route