

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE
HIDRÓGENO

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Septiembre 2023

AUTOR: EMILIO MARÍA DOLORES SÁNCHEZ
DIRECTOR: ABEL RIQUELME NAVARRO

Firmado digitalmente
por MARIA DOLORES
SANCHEZ EMILIO -
23301378D

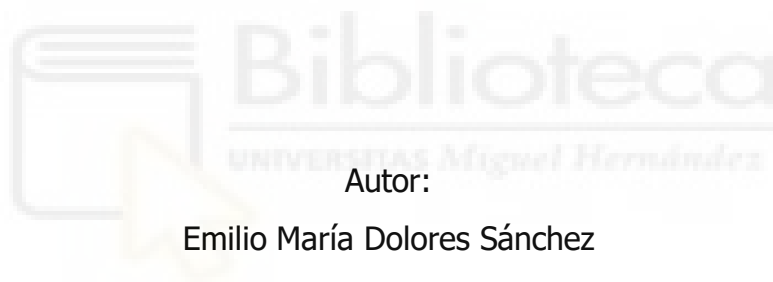
Fecha: 2023.09.04
13:16:31 +02'00'

Firmado digitalmente por
ABEL RIQUELME |
NAVARRO | ARCAS

Fecha: 2023.09.04
12:36:28 +02'00'

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO.



Autor:

Emilio María Dolores Sánchez

Tutor:

Abel Riquelme Navarro Arcas

Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía

Escuela Técnica Superior de Elche

Universidad Miguel Hernández

Elche, 2023

A mis profesores
A mis amigos y a mi familia



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mis padres, que siempre han estado ahí para mí, apoyándome incondicionalmente en todo lo que he hecho. Gracias por vuestro amor, vuestro apoyo incondicional y vuestros consejos. Sin vosotros, no habría conseguido llegar hasta aquí.

También quiero agradecer a mi novia, por su amor, su comprensión, su apoyo y su paciencia durante todo este proceso. Gracias por creer en mí y por animarme a seguir adelante.

Agradezco también a compañeros y amigos por su ayuda en la realización de este camino. Gracias por compartir conmigo este viaje y por hacer que esta etapa universitaria haya sido tan especial.

Finalmente, quiero agradecer a mis profesores, por sus enseñanzas, su paciencia y su apoyo. Gracias por ayudarme a aprender y a crecer como ingeniero.

Sin todos vosotros, este trabajo no habría sido posible. Hoy puedo decir que estoy totalmente habilitado para ejercer la profesión de Ingeniero Industrial.

RESUMEN

Es sabido de la importancia de la energía en el mundo. Hasta la fecha se ha basado principalmente en el consumo de combustibles fósiles, provocando el agotamiento de los recursos naturales y activando un cambio climático como consecuencia del CO₂ emitido.

Existe en los últimos años una preocupación creciente de todos los organismos europeos respecto a esta crisis climática y de recursos. A esto hay que sumar la situación de conflicto que se vive en Ucrania, la cual ha evidenciado la dependencia que tienen los países europeos de los países exportadores de combustibles fósiles. La consecuencia de todo esto es una apuesta muy contundente de la Unión Europea por las energías verdes.

En el ámbito de las energías verdes se hace básico el desarrollar la cadena de valor del hidrógeno como vector energético. El desarrollo de la infraestructura del hidrógeno es de vital importancia para poder descarbonizarnos y para ir, poco a poco, dejando atrás la dependencia de los países exportadores de combustibles fósiles.

ABSTRACT

The importance of energy in the world is well known. To date, it has been based mainly on the consumption of fossil fuels, causing the depletion of natural resources, and activating climate change because of the CO₂ emitted.

In recent years, there has been a growing concern among all European bodies about this climate and resource crisis. To this we must add the situation of conflict that is taking place in Ukraine, which has evidenced the dependence that European countries have on fossil fuel exporting countries. The consequence of all this is a very strong commitment by the European Union to renewable energy.

In the field of renewable energy, it is essential to develop the hydrogen value chain as an energy vector. The development of hydrogen infrastructure is vital to decarbonize ourselves and to gradually leave behind our dependence on fossil fuel exporting countries.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	19
1.1. INTRODUCCIÓN. EL HIDRÓGENO: VECTOR ENERGÉTICO PARA UNA ECONOMÍA DESCARBONIZADA.....	20
1.2. OBJETIVOS.....	22
2. MATERIAL Y MÉTODO.	23
2.1. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES.....	24
2.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN	24
2.3. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	25
2.4. ORGANIZACIÓN DE LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.	26
3. EL HIDRÓGENO Y SUS PROPIEDADES.....	27
3.1. EL HIDRÓGENO Y SU PRODUCCIÓN.....	28
3.1.1. HIDRÓGENO VERDE.....	29
3.1.2. HIDRÓGENO GRIS.....	30
3.1.3. HIDRÓGENO AZUL.....	31
3.2. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO	31
3.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS.	31
DENSIDAD.	31
RELACIÓN DE EXPANSIÓN.	32
FACTOR DE COMPRESIBILIDAD.....	33
TEMPERATURAS DE CAMBIO DE FASE.	33
3.2.2. PROPIEDADES QUÍMICAS	34
POTENCIAL ENERGÉTICO.	34
RANGO DE INFLAMABILIDAD Y EXPLOSIÓN.....	35
OTRAS PROPIEDADES QUÍMICAS	35
4. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.....	37
4.1. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.....	38
4.1.1. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO	38
4.1.2. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO LÍQUIDO (LOHC)	42
4.1.3. ALMACENAMIENTO EN ESTADO SÓLIDO.....	46

5.	<i>DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO</i>	51
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	52
5.2.	TRANSPORTE DE HIDRÓGENO COMO GAS COMPRIMIDO.....	53
5.2.1.	<i>POR MAR MEDIANTE GASODUCTOS</i>	53
	SITUACIÓN ACTUAL Y BENEFICIOS DE SU UTILIZACIÓN.....	53
	UTILIZACIÓN DE GASEODUCTOS EXISTENTES Y CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS GASEODUCTOS	54
	CONDICIONES DEL HIDRÓGENO PARA SU TRANSPORTE EN GASODUCTOS	55
5.2.2.	<i>POR CARRETERA</i>	57
5.3.	TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LÍQUIDO.....	57
5.3.1.	<i>POR MAR</i>	57
5.3.2.	<i>POR CARRETERA</i>	58
5.4.	TRANSPORTE DE HIDRÓGENO EN ESTADO SÓLIDO	59
6.	<i>MARCO NORMATIVO</i>	61
6.1.	MARCO NORMATIVO DEL ALMACENAMIENTO.....	62
6.1.1.	<i>ALMACENAMIENTO EN LUGAR DE PRODUCCIÓN</i>	62
6.1.2.	<i>ALMACENAMIENTO EN LUGAR DE CONSUMO</i>	62
6.2.	MARCO NORMATIVO DE DISTRIBUCIÓN.....	64
6.2.1.	<i>POR CARRETERA</i>	64
6.2.2.	<i>POR MAR</i>	67
7.	<i>CONCLUSIONES</i>	69
8.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	75
8.1.	REFERENCIAS.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VALORES DE PCI Y PCS A 1ATM Y 25°C.[8]	35
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DEPÓSITOS ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO COMPRIMIDO (CGH ₂).40	
TABLA 3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL TRANSPORTE DE HIDRÓGENO A ALTA PRESIÓN.....	57
TABLA 4. ENSAYOS PARA HOMOLOGACIÓN DE DEPÓSITOS DE HIDRÓGENO GASEOSO COMPRIMIDO DE VEHÍCULOS PROPULSADOS POR HIDRÓGENO	63
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE HIDRÓGENO Y REQUISITOS EN ADR PARA TRANSPORTE POR CARRETERA	65
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE HIDRÓGENO Y REQUISITOS DE IMDG CODE PARA TRANSPORTE POR MAR	68



INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. EVOLUCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ Y POBLACIÓN MUNDIAL. [1].....	20
FIGURA 2. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN DEL HIDRÓGENO. [2].....	28
FIGURA 3. SITUACIÓN ACTUAL DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO. [3].....	28
FIGURA 4. CELDA ELECTROLÍTICA. [5]	29
FIGURA 5. RELACIÓN DE EXPANSIÓN ENTRE EL HIDRÓGENO EN ESTADO LÍQUIDO Y EL HIDRÓGENO EN ESTADO GAS (FUENTE [7])	32
FIGURA 6. PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN ESPECÍFICO DEL HIDRÓGENO EN ESTADO GAS Y EN ESTADO LÍQUIDO. FUENTE [8]	33
FIGURA 7. DIAGRAMA DE FASES DEL HIDRÓGENO (FUENTE: [7]).....	34
FIGURA 8. CLASIFICACIÓN DE TANQUES EXISTENTES PARA EL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO. [10].....	39
FIGURA 9. TANQUE ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO COMPRIMIDO TIPO IV [11].	40
FIGURA 10. BLOQUE DE CILINDROS DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO. [12].....	41
FIGURA 11. SISTEMA LINDE-HAMPSON PARA LA LICUEFACCIÓN DE GASES. [13].....	43
FIGURA 12. ESFERA DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO LÍQUIDO. [14]	44
FIGURA 13. TECNOLOGÍA IRAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO LÍQUIDO. [14]	45
FIGURA 14. LÍMITES REGULATORIOS DE MEZCLA DE HIDRÓGENO. [16]	54
FIGURA 15. RED DE GASEODUCTOS DE ESPAÑA. [17]	55
FIGURA 16. TRANSPORTE DE HIDRÓGENO POR CARRETERA EN CILINDROS. [18]	57
FIGURA 17. BUQUE GASERO SUISEO FRONTIER	58
FIGURA 18. CAMIÓN CISTERNA DE TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LÍQUIDO PLUG	59
FIGURA 19. LOGÍSTICA DEL HIDRÓGENO	70
FIGURA 20. COSTE POR KG DE TRANSPORTE DE HIDRÓGENO EN FUNCIÓN DE VOLUMEN TRANSPORTADO Y DISTANCIA AL DESTINO. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE [25] ..	73

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

Se realiza la introducción al proyecto donde se citarán los elementos que lo componen y se explican los objetivos principales de este trabajo.

1.1. INTRODUCCIÓN. EL HIDRÓGENO: VECTOR ENERGÉTICO PARA UNA ECONOMÍA DESCARBONIZADA.

Es conocido que las empresas más poderosas del planeta tienen como principal negocio la energía. Y esto, principalmente, es porque no se entiende el desarrollo humano sin el consumo energético.

El crecimiento demográfico ha llevado a un incremento significativo de las emisiones de CO₂ en los últimos 40 años, lo cual ha generado consecuencias negativas para el medio ambiente.

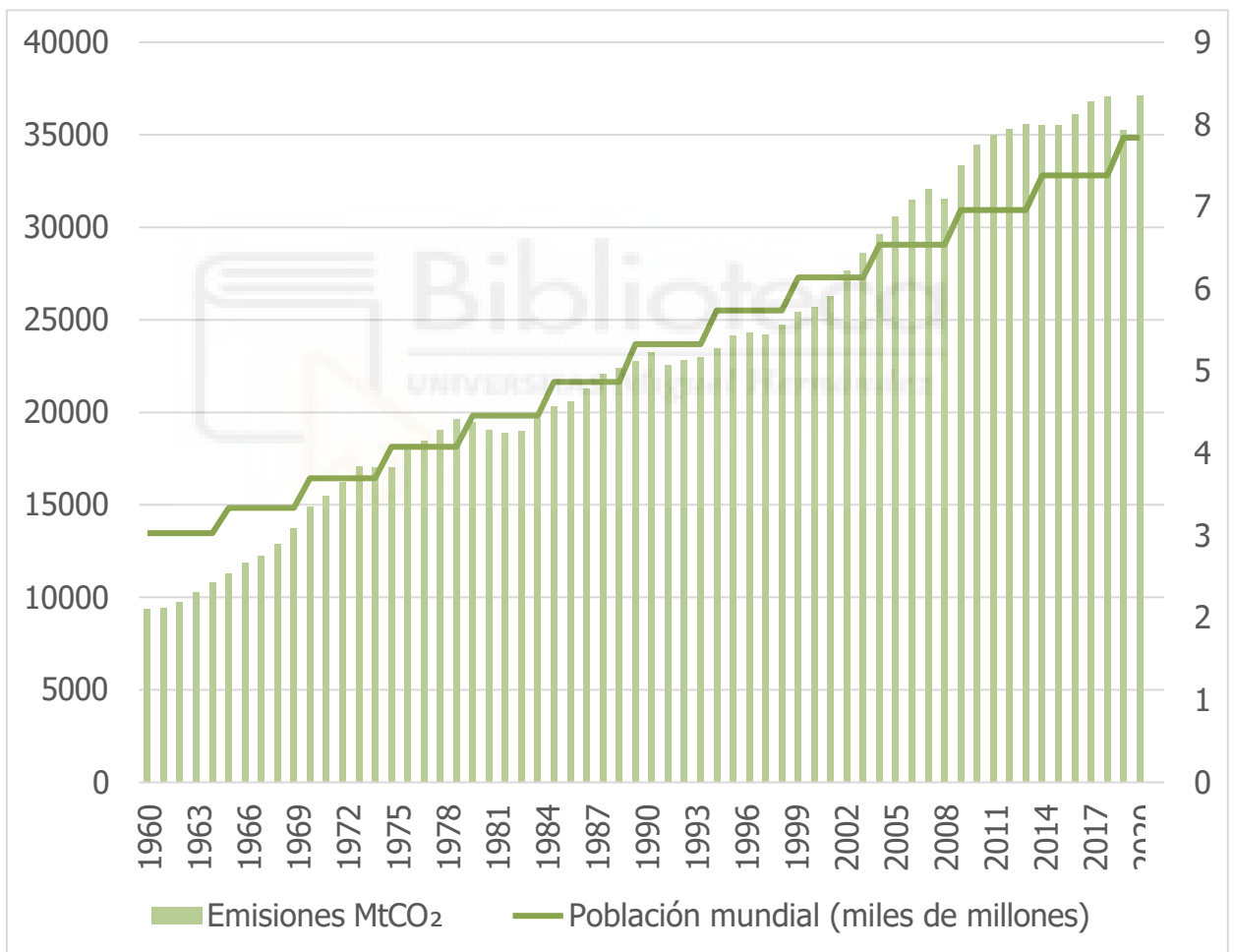


Figura 1. Evolución de emisiones de CO₂ y población mundial.[1]

Las emisiones de CO₂, como resultado de diversas actividades humanas, son consideradas una de las mayores fuentes de contaminación atmosférica. Estas emisiones tienen efectos perjudiciales como el aumento del nivel del mar, la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos y el calentamiento global.

Las principales potencias mundiales han comenzado a mostrar interés por la descarbonización del planeta debido a las preocupaciones ambientales. Durante el año 2021, la temperatura promedio de la Tierra fue 1,1 °C más alta que a finales del siglo XIX, marcando así el inicio de la revolución industrial [1].

Sin embargo, el panorama energético mundial ha experimentado cambios significativos durante el año 2022 debido a la guerra de Ucrania. El acceso al petróleo y al gas se ha dificultado como consecuencia del conflicto bélico, lo que ha empujado a la Unión Europea a acelerar hacia las energías verdes y la autosuficiencia energética. En este sentido, las fuentes de energía renovable, como la energía eólica, la energía solar y los combustibles verdes, están emergiendo como las opciones clave para el futuro. Entre estas fuentes, el hidrógeno se destaca como un vector energético esencial, ya que permite el almacenamiento y transporte eficiente de energía

El hidrógeno constituye el 75% de la masa de todo el universo, siendo así el elemento más abundante. Una de sus características más destacables del hidrógeno es su capacidad como combustible limpio. Durante su utilización como combustible, no genera dióxido de carbono (CO₂) ya que, al combinarse con el oxígeno, solo se produce agua como subproducto. Esta propiedad lo convierte en una alternativa prometedora para la reducción de emisiones contaminantes y la transición hacia una economía descarbonizada.

Este trabajo se centrará en la temática del "almacenamiento y transporte de hidrógeno". Se evaluarán los elementos que componen esta área de estudio, analizando las propiedades relevantes a considerar en el almacenamiento y distribución de hidrógeno. También se examinarán las diferentes formas de almacenamiento, como el almacenamiento de hidrógeno comprimido, el almacenamiento en forma líquida y el almacenamiento sólido, así como sus opciones de distribución.

1.2. OBJETIVOS.

Se enumeran los objetivos fijados en la resolución y plan de trabajo de este TFM.

- Conocer propiedades del hidrógeno como vector energético.
- Investigación de las diferentes tecnologías almacenamiento de hidrógeno.
- Estudio de las distintas opciones para el transporte de hidrógeno.
- Definición de árbol de decisión para seleccionar, en el contexto actual, la mejor alternativa para el almacenamiento y distribución de hidrógeno según su uso final.



2. MATERIAL Y MÉTODO.

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo la investigación bibliográfica sobre almacenamiento y distribución de hidrógeno. Se describe cómo se seleccionaron las fuentes bibliográficas, se recopiló la información y se analizó críticamente para lograr los objetivos del trabajo.

2.1. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES.

Se inició el proceso de recopilación de información identificando fuentes relevantes acerca del almacenamiento y distribución de hidrógeno. Para ello, se han búsquedas exhaustivas en bases de datos académicas y científicas, como Google Académico, utilizando palabras clave como "hidrógeno", "almacenamiento de hidrógeno", "distribución de hidrógeno", entre otras. También se listó de forma directa la información disponible en la web de empresas líderes del sector y se consultaron webs gubernamentales para evaluar la información disponible.

2.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN.

A continuación, se describe el enfoque y los criterios de selección seguidos para la selección de las fuentes bibliográficas utilizadas sobre almacenamiento y distribución de hidrógeno.

- **Relevancia Temática:** Se han priorizado fuentes que abordaran directamente las tecnologías de almacenamiento y distribución de hidrógeno.
- **Actualidad:** Se ha dado preferencia a fuentes recientes para asegurar que la información estuviera alineada con los desarrollos de las tecnologías más actuales.
- **Autoridad y Credibilidad:** Se han considerado, basado en experiencia profesional, fuentes provenientes de instituciones académicas confiables, expertos en la materia y organizaciones líderes en la industria del hidrógeno, como la NASA, Air Liquide y la Agencia Internacional de Energía (IEA).
- **Perspectiva:** Se ha buscado una variedad de fuentes que abordaran el tema desde diferentes perspectivas, incluyendo aspectos prácticos del almacenamiento y distribución de hidrógeno.

- **Accesibilidad:** Se han seleccionado fuentes disponibles en plataformas académicas, bibliotecas universitarias, y sitios web de organizaciones gubernamentales y corporativas, asegurando así la confiabilidad y la accesibilidad de la información.

2.3. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN.

En la etapa de recopilación de información para la elaboración de este trabajo, se ha llevado a cabo una selección de fuentes bibliográficas. Entre las fuentes destacadas utilizadas en este proceso se encuentran diversas categorías que aportan solidez y amplitud al estudio.

En primer lugar, se recurrió a plataformas académicas reconocidas, como Google Académico, para acceder a una variedad de artículos científicos y estudios relevantes relacionados con el almacenamiento y distribución de hidrógeno. Esta fuente proporcionó una base sólida de conocimiento académico actualizado.

Adicionalmente, se consultaron libros publicados por instituciones universitarias y expertos destacados en el campo. Estos recursos aportaron una perspectiva más profunda y fundamentada sobre los aspectos teóricos y prácticos del tema.

Para garantizar una visión completa de los avances en la materia, se tomaron en cuenta las publicaciones emitidas por entidades y empresas líderes en la industria del hidrógeno, como Air Liquide y la NASA. Estas fuentes proporcionaron información sobre investigaciones de vanguardia, tecnologías emergentes y aplicaciones innovadoras en el almacenamiento y distribución de hidrógeno.

Un recurso de especial relevancia fue el "Marco Estratégico para la Transición Energética", publicado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) del Gobierno de España. Este documento ofreció una visión integral de las políticas y estrategias gubernamentales en el contexto de la transición hacia fuentes energéticas más sostenibles, enriqueciendo el análisis con una perspectiva socioeconómica y ambiental.

La selección diversificada de estas fuentes se realizó con el propósito de garantizar la robustez y actualidad de la información recopilada, así como obtener una visión holística y completa del tema de estudio.

2.4. ORGANIZACIÓN DE LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.

Para asegurar un enfoque coherente y completo en el análisis del almacenamiento y distribución de hidrógeno, las fuentes bibliográficas se han organizado según los diferentes aspectos a tratar durante el trabajo.

Todas las fuentes bibliográficas registradas en el capítulo 0 se han gestionado a través del software Zotero, el cual se ha utilizado para generar las citas y referencias que aparecen durante el documento.



3. EL HIDRÓGENO Y SUS PROPIEDADES.

En este capítulo se abordan los distintos tipos de hidrógeno en función de su método de producción, específicamente los categorizados como verde, gris y azul. Además, se lleva a cabo descripción de sus propiedades fundamentales, tanto físicas como químicas que se tienen que considerar en el transporte y almacenamiento de este vector energético.

3.1. EL HIDRÓGENO Y SU PRODUCCIÓN.

El hidrógeno constituye el 75% de la masa de todo el universo, siendo así el elemento más abundante. Es el primer elemento de la tabla periódica y forma parte del grupo 1.

Una de las características más destacables del hidrógeno es su capacidad como combustible limpio. Durante su utilización como combustible, no genera dióxido de carbono (CO₂) ya que, al combinarse con el oxígeno, solo se produce agua como subproducto. Esta propiedad lo convierte en una alternativa prometedora para la reducción de emisiones contaminantes y la transición hacia una economía descarbonizada.

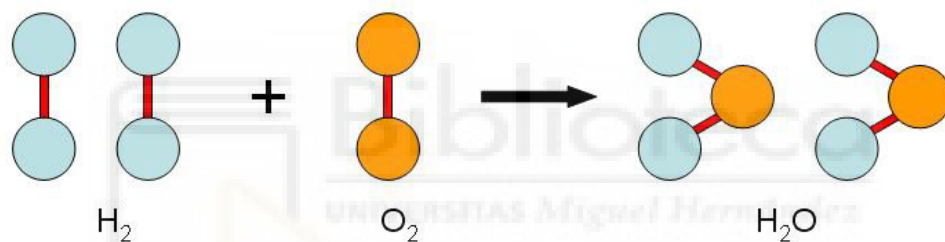


Figura 2. Reacción de combustión del Hidrógeno.[2]

En cuanto a la producción de hidrógeno, existen diferentes métodos y clasificaciones en función de la materia prima utilizada para su obtención y de la cantidad de CO₂ emitido.

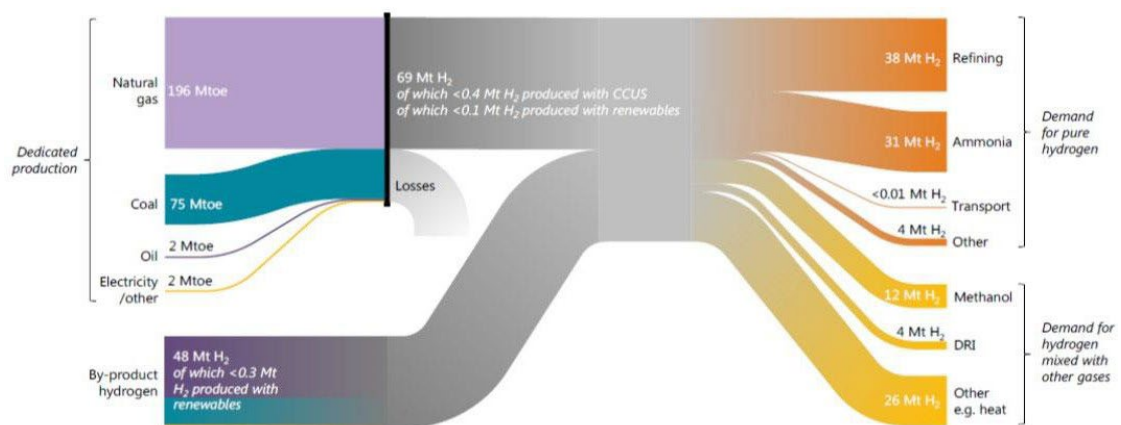


Figura 3. Situación actual de producción de Hidrógeno. [3]

3.1.1. HIDRÓGENO VERDE.

Se obtiene mediante electrólisis utilizando electricidad procedente de una fuente renovable y agua como materia prima.

Se lleva a cabo utilizando dos electrodos, uno denominado ánodo y otro cátodo, sumergidos en una solución de agua con una pequeña cantidad de electrolito para aumentar la conductividad. Al aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre los electrodos, se genera un campo eléctrico externo que es mayor al campo eléctrico molecular presente en el agua. Esto provoca la ruptura del enlace covalente del agua (H₂O), separando el hidrógeno (H₂) y el oxígeno (O₂) que lo componen.

En el ánodo, ocurre una oxidación donde los aniones liberan electrones, y en el cátodo, se produce una reducción donde los cationes capturan electrones. En el caso del agua, en el ánodo se liberan iones hidróxido (OH⁻) y se genera oxígeno gaseoso (O₂), mientras que en el cátodo se forman iones hidrógeno (H⁺) y se produce hidrógeno gaseoso (H₂). [4]

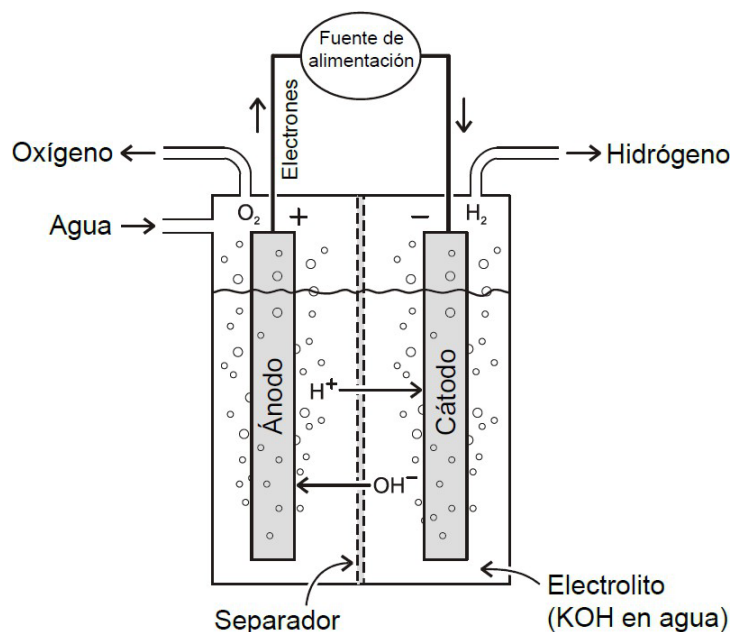
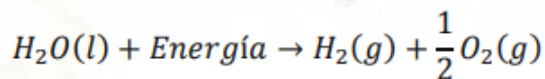


Figura 4. Celda electrolítica.[5]

El hidrógeno obtenido a partir de la biomasa y con la utilización de energía renovable también es considerado hidrógeno verde. Esto se puede lograr mediante diferentes procesos[6].

- Gasificación de la biomasa: implica la transformación termoquímica de la biomasa a altas temperaturas, por encima de 700 °C, con un suministro controlado de oxígeno o vapor. Este proceso genera gas sintético, que contiene hidrógeno y otros componentes gaseosos.
- Fermentación bacteriana. Algunos grupos de bacterias fermentadoras tienen la capacidad de generar hidrógeno a partir de azúcares simples presentes en la biomasa. Este proceso biológico ofrece una alternativa sostenible para producir hidrógeno renovable.

3.1.2. HIDRÓGENO GRIS.

Se considera hidrógeno gris el obtenido a partir de gas natural o hidrocarburos. Los procesos más relevantes son:

- Oxidación parcial (POX) es un proceso en el cual se utiliza el contenido energético del metano para disociarlo. En este proceso, se lleva a cabo la oxidación de los carbonos presentes en el metano, dejando los hidrógenos libres. La oxidación parcial puede realizarse utilizando oxígeno puro o aire en presencia de catalizadores. En producciones industriales a gran escala, se estima que la eficiencia de este proceso es alrededor del 70%. La reacción tiene lugar a temperaturas superiores a 800 °C. Se obtiene como subproducto CO₂.
- Reformado de hidrocarburos con vapor de agua (SMR). Es el método principal utilizado a nivel industrial para obtener hidrógeno. Su eficiencia se estima ligeramente por encima del 80%. En este proceso, el gas natural, que contiene principalmente metano (~90%), se expone al vapor de agua a altas temperaturas. Esto provoca una reacción química en la

cual el vapor de agua reacciona con el metano, generando hidrógeno. Debido al alto contenido de metano y a la disponibilidad del gas natural, este hidrocarburo es ampliamente utilizado en el reformado con vapor de agua

3.1.3. HIDRÓGENO AZUL.

El hidrógeno azul, al igual que el hidrógeno gris, se produce a partir de fuentes de energía fósiles. Se presenta como una opción sostenible debido a que el CO₂ liberado durante la generación de hidrógeno se captura y se almacena en lugar de ser liberado a la atmósfera.

Aunque el hidrógeno azul sigue dependiendo de fuentes de energía fósiles, minimiza su impacto ambiental al evitar la liberación de CO₂, lo que lo convierte en una opción intermedia en el camino hacia el uso de fuentes renovables para la producción de hidrógeno.

3.2. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO.

Se presentan, a continuación, las principales propiedades del hidrógeno que han de ser consideradas para su almacenamiento y distribución.

3.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS.

Las propiedades físicas del hidrógeno más relevantes son las siguientes.

DENSIDAD.

El hidrógeno, con su bajo peso atómico, tiene una densidad extremadamente baja en estado líquido y gaseoso. Su densidad depende de la temperatura y la presión, especialmente cuando está en estado gas.

El volumen específico del hidrógeno gaseoso es de 11,9 m³/kg a 20 °C y 1 atm, mientras que el del hidrógeno líquido es de 0,014 m³/kg a -253 °C y 1 atm.

En términos de peso específico, el hidrógeno gaseoso tiene un valor de 0,0696 referenciado a la densidad del aire en condiciones estándar ($p_{\text{aire}} = 1,2754 \text{ kg/m}^3$). Su densidad es solo el 6,96% de la densidad del aire. En estado líquido, el hidrógeno es aún menos denso que el agua, con un peso específico de 0,0708 referenciado a la densidad del agua ($p_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$), es decir, el 7,08% de la densidad del agua.

A pesar de esto, el agua contiene más masa de hidrógeno por unidad de volumen que el propio hidrógeno líquido. Otros compuestos líquidos que contienen hidrógeno, como el metanol y el heptano, también muestran una mayor masa de hidrógeno por unidad de volumen en comparación con el hidrógeno puro.

RELACIÓN DE EXPANSIÓN.

Cuando el hidrógeno se encuentra almacenado en forma líquida y se libera a condiciones atmosféricas, experimenta una vaporización y expansión que resulta en un aumento significativo de volumen. La relación de expansión del hidrógeno, como se muestra en la Figura 5, es de 1:848, lo que significa que el hidrógeno en estado gaseoso bajo condiciones atmosféricas ocupa 848 veces más volumen que cuando está en estado líquido [7].

Por otro lado, el hidrógeno almacenado en estado gaseoso a una presión de 250 bar y temperatura atmosférica, su relación de expansión a presión atmosférica es de 1:240.

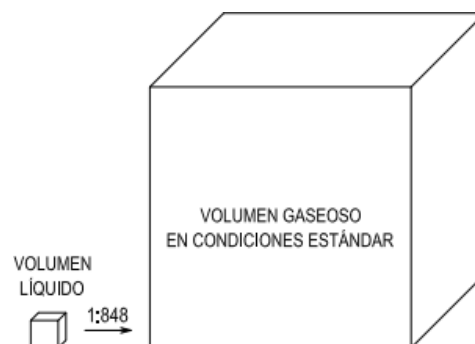


Figura 5. Relación de expansión entre el hidrógeno en estado líquido y el hidrógeno en estado gas (Fuente [7])

FACTOR DE COMPRESIBILIDAD.

El factor de compresibilidad es una propiedad física del hidrógeno muy relevante para cuantificar el hidrógeno que se puede almacenar en un recipiente.

Observando la Figura 6, el volumen específico del hidrógeno disminuye si se aumenta la presión. Este fenómeno se estabiliza a partir de 750 bar, punto a partir del cual el incremento de presión apenas influye en el volumen ocupado.

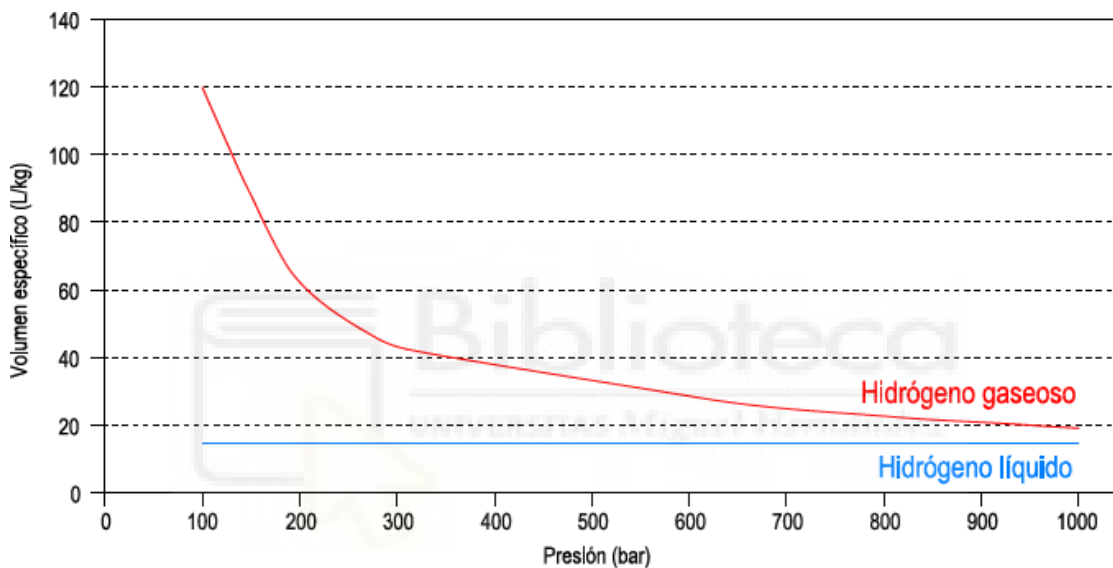


Figura 6. Presión en función del volumen específico del hidrógeno en estado gas y en estado líquido.

Fuente [8]

Aumentando la presión al hidrógeno gaseoso se consigue una reducción importante de volumen facilitando así su almacenamiento y distribución.

TEMPERATURAS DE CAMBIO DE FASE.

En la Figura 7, en el diagrama de fases del H₂, se muestra el estado del hidrógeno en función de la temperatura y de la presión a la que se encuentre. El punto triple se sitúa a 0,0696 atm y 13,8 K mientras que el punto crítico se sitúa a 13,8 atm y 33,2 K.

En condiciones ambientales, el hidrógeno posee una temperatura de fusión de 14 K y una temperatura de ebullición de 20,15 K.

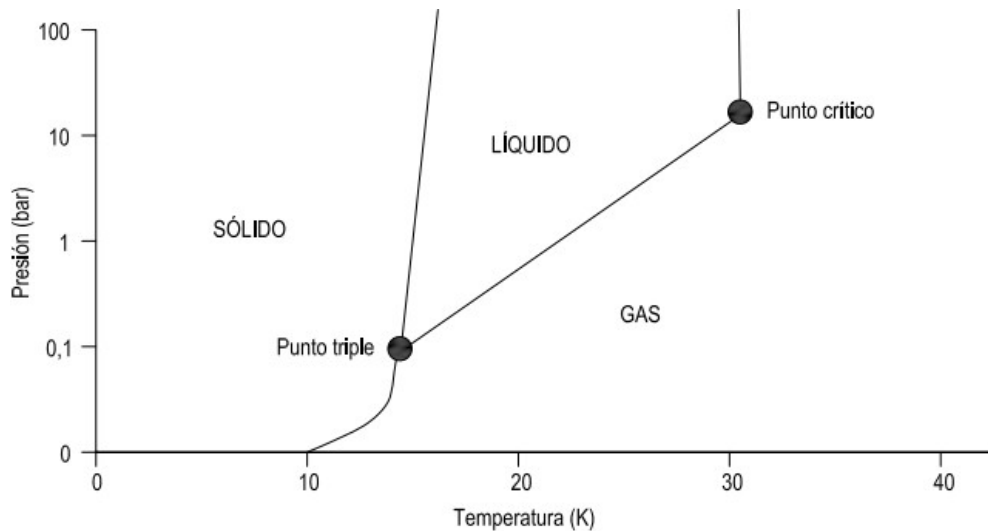


Figura 7. Diagrama de fases del hidrógeno (Fuente:[7])

Esto hace que el hidrógeno, cuando se encuentra en estado líquido, sea muy volátil y se evapore rápidamente. Por tanto, será de suma importancia que los depósitos contenedores tengan un gran aislamiento térmico para evitar pérdidas.

3.2.2. PROPIEDADES QUÍMICAS.

Se exponen las propiedades químicas más relevantes del hidrógeno a considerar para su almacenamiento y distribución.

POTENCIAL ENERGÉTICO.

Cuando el hidrógeno se combina con el oxígeno, se libera una cantidad fija de energía y se forma agua como producto. Esta energía liberada se cuantifica mediante el poder calorífico superior (PCS) (productos en forma líquida) o el poder calorífico inferior (PCI) (productos en forma de vapor). Ambas medidas representan la cantidad de energía por unidad de masa de hidrógeno.

En la Tabla 1 se recogen el PCI y el PCS, de los combustibles más comunes.

Combustible	PCI(MJ/Kg)	PCS(MJ/Kg)
H ₂	119,93	141,86
Diésel	42,50	44,80
Gasolina	44,50	47,50
Propano	45,60	50,36
Metano	50,02	55,53

Tabla 1. Valores de PCI y PCS a 1atm y 25°C.[8]

El hidrógeno es el combustible que presenta una mayor energía por kg, posee un PCI 2,5 veces mayor que el de los combustibles tradicionales (diésel y gasolina).

RANGO DE INFLAMABILIDAD Y EXPLOSIÓN.

El rango de inflamabilidad de un combustible es el intervalo de concentraciones en el aire en el cual puede arder. Tiene un límite inferior, que indica la concentración mínima necesaria para la combustión, y un límite superior, que indica la concentración máxima en la cual el combustible puede arder. Es importante conocer este rango para prevenir situaciones peligrosas al manipular y almacenar combustibles.

La inflamabilidad del hidrógeno en el aire tiene un rango desde el 4% al 74% y un rango de explosividad en concentraciones desde el 18,3% hasta el 59% a temperatura atmosférica estándar (25°C). El riesgo de explosión es mucho menor que el de vapores de combustibles tradicionales (vapores de gasolina explotan en concentraciones ligeramente superiores al 1%).[9].

OTRAS PROPIEDADES QUÍMICAS.

- Energía de combustión. El hidrógeno requiere una energía de 0.02 mJ para iniciar la combustión dentro de su rango de inflamabilidad.

- Fragilización. Elemento muy reactivo al entrar en contacto con sustancias metálicas. Requiere almacenamientos que resistan al ataque corrosivo del hidrógeno. De no ser así, puede aparecer una disminución en la ductilidad y en la resistencia del material. Las aleaciones recomendadas para el almacenamiento de hidrógeno son las aleaciones de aluminio, las aleaciones de cobre y el acero inoxidable.
- Por el contrario, se recomienda no utilizar aleaciones de titanio, aleaciones de hierro ni aleaciones de níquel.
- Temperatura de autoignición. El hidrógeno arde espontáneamente en presencia de aire sin necesidad de una fuente de ignición a 585°C.
- Baja conductividad eléctrica. Su agitación puede generar cargas electrostáticas y producir chispas. Requiere especial atención en la puesta a masa de los equipos de almacenamiento.
- Llama. Su llama es azul y es casi invisible en el periodo diurno para el ojo humano. Como consecuencia de la volatilidad y difusividad del hidrógeno, su llama es localizada y vertical.

4. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.

En este capítulo se desarrollan las diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno: en estado criogénico, en estado de gas comprimido y en estado sólido.

4.1. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.

Como se ha visto en el punto 3.2, el hidrógeno se caracteriza por ser un combustible altamente energético en relación con su masa, pero presenta una densidad energética menor a la que tienen otros combustibles si consideramos su volumen. Esto implica que, para satisfacer las demandas energéticas de procesos intensivos, se necesitan grandes cantidades de hidrógeno. Esta situación representa un desafío significativo, especialmente en el ámbito del transporte, donde se busca maximizar la eficiencia del almacenamiento.

Para abordar este desafío, existen tres alternativas que permiten almacenar la mayor cantidad de hidrógeno en el menor volumen posible. La primera opción es el almacenamiento de hidrógeno comprimido, donde se somete el gas a altas presiones para reducir su volumen y aumentar su densidad energética. La segunda opción es el almacenamiento de hidrógeno en estado líquido, aprovechando su baja temperatura de ebullición para condensarlo y lograr una mayor densidad energética. Por último, existe la opción de almacenar el hidrógeno en forma de compuestos sólidos, utilizando materiales capaces de adsorber o absorber el hidrógeno.

4.1.1. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO

El almacenamiento de hidrógeno gas presurizado es la opción más desarrollada y empleada. Esta opción de almacenamiento es energéticamente costosa.

El mejor trabajo de compresión se logra en los procesos isoterms, en los que la energía empleada en la compresión del hidrógeno depende de la presión final. Una manera práctica de evaluar el costo de la energía requerida para comprimir el hidrógeno es expresarlo como un porcentaje de la energía total contenida en el hidrógeno almacenado. La compresión de 1 kg de hidrógeno desde la presión atmosférica hasta 200 y 700 bar utilizando un compresor de múltiples etapas requiere 10 y 17 MJ de energía, respectivamente. Estos valores representan aproximadamente un 8 y 14% del poder calorífico inferior del hidrógeno.[8]

El hidrógeno presurizado se almacena en depósitos cilíndricos (Figura 8) con forma cilíndrica y con extremos esféricos. En uno de los extremos se instalan válvulas para permitir y regular el flujo de hidrógeno que entra y sale, junto con dispositivos de descompresión que cuentan con orificios de ventilación.

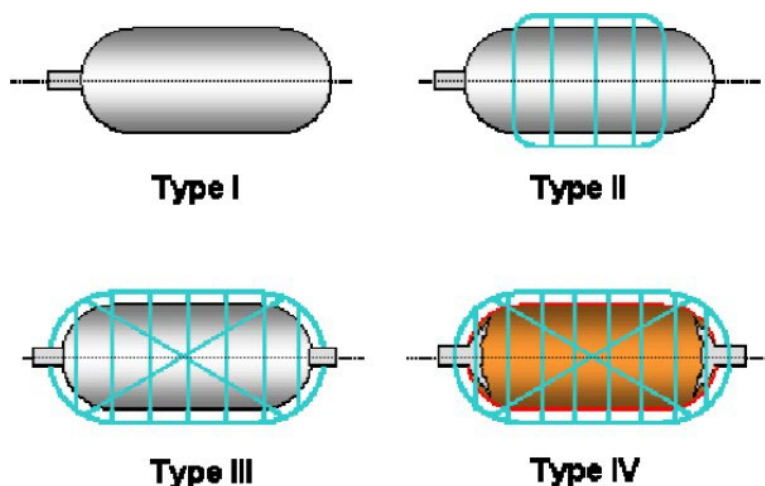


Figura 8. Clasificación de tanques existentes para el almacenamiento de hidrógeno comprimido.[10]

Los depósitos disponibles en el mercado se fabrican con materiales basados en fibras de vidrio, fibras de carbono y aluminio. Su clasificación de acuerdo con su composición[5], [8] queda de la siguiente manera:

- Tipo I: depósitos sin costuras fabricados en acero o aluminio. En aluminio trabajan a presiones inferiores a 175 bar y en acero pueden alcanzar hasta los 200 bar. Son muy pesados, tienen una capacidad gravimétrica (relación entre el hidrogeno almacenado y la masa del tanque) de 1 a 1,5 kg/L. Son la opción económica para el almacenamiento de hidrógeno.
- Tipo II. Son también depósitos de acero o aluminio sin costuras, pero están reforzados parcialmente con fibra de carbono en la dirección del aro del cilindro. Son capaces de soportar presiones de 350 bar. Son pesados, pero al trabajar a presiones más altas tienen mejor capacidad gravimétrica que los depósitos tipo I (0,65 – 1,30 kg/L). Se emplean mayoritariamente en hidrogeneras.

- Tipo III. Se diferencian del tipo II en que estos poseen un forro embobinado completamente en su interior con fibra de carbono. Soportan presiones de hasta 350 bar. Sus paredes son más finas y presentan mejor capacidad gravimétrica (0,30 – 0,45 kg/L) que los tipos I y II.
- Tipo IV. Poseen un forro interno de material plástico con el fin de evitar la difusión del hidrógeno reforzado con fibras de carbono. Poseen una capa exterior de fibra de vidrio para protegerlo externamente. Alcanzan los 700 bar de presión y son mucho más ligeros que los tipos I, II y III lo que los hace muy interesantes para aplicaciones de automoción.

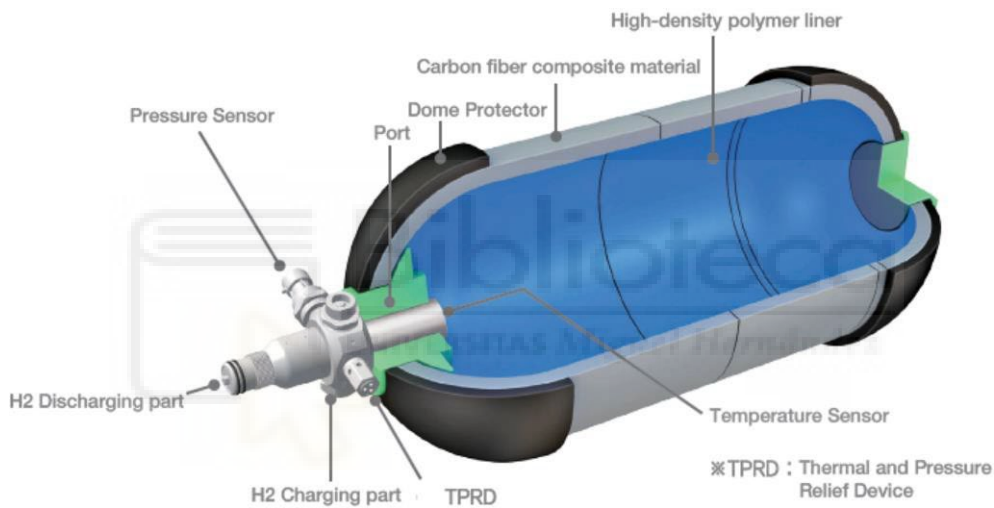


Figura 9. Tanque almacenamiento hidrógeno comprimido tipo IV [11].

Tipo	Presión (bar)	Capacidad gravimétrica (kg/L)
I	200	1 - 1,5
II	350	0,65 - 1,30
III	350	0,30 - 0,45
IV	700	0,30 - 0,45

Tabla 2. Clasificación depósitos almacenamiento hidrógeno comprimido (CGH2).

Es común ver almacenamientos de hidrógeno mediante el uso de cilindros de hidrógeno agrupados en bloques.



Figura 10. Bloque de cilindros de hidrógeno comprimido.[12]

Los depósitos cilíndricos presurizados son una forma común de almacenar hidrógeno, pero tienen limitaciones importantes.

En primer lugar, son voluminosos. Los depósitos de hidrógeno gaseoso a 250 bar ocupan aproximadamente cuatro veces más volumen que los depósitos de hidrógeno líquido. Esto puede ser un problema en aplicaciones móviles, donde el espacio es limitado.

En segundo lugar, los depósitos cilíndricos presurizados son pesados. Los depósitos de hidrógeno gaseoso a 250 bar pesan aproximadamente cuatro veces más que los depósitos de hidrógeno líquido. Esto puede limitar el alcance de los vehículos propulsados por hidrógeno.

Aunque aumentar la presión del hidrógeno gaseoso puede reducir el volumen necesario para su almacenamiento, también requiere depósitos más robustos.

Como resultado, la relación entre el peso total del sistema y el volumen de hidrógeno apenas cambia.

En general, los depósitos cilíndricos presurizados son una buena opción para aplicaciones estacionarias, donde el espacio y el peso no son factores críticos. Sin embargo, para aplicaciones móviles, donde el espacio y el peso son importantes, es necesario desarrollar nuevas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.

4.1.2. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO LÍQUIDO (LOHC).

El hidrógeno líquido tiene una densidad gravimétrica y energética significativamente mayor que el hidrógeno gaseoso. Esto significa que se puede almacenar más hidrógeno en un espacio dado en forma líquida que en forma gaseosa.

La licuefacción del hidrógeno es un proceso que reduce su volumen a un tercio del que tiene en estado gaseoso a temperatura ambiente. Esto permite almacenar hidrógeno en depósitos más pequeños y ligeros, lo que es ideal para aplicaciones móviles.

El proceso de licuefacción del hidrógeno es complejo y requiere temperaturas muy bajas ($-240\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este es el principal desafío de la licuefacción del hidrógeno, ya que requiere equipos especializados y costosos.

El proceso para lograr la licuefacción del hidrógeno es conocido como ciclo de Linde o ciclo de expansión de Joule-Thompson.

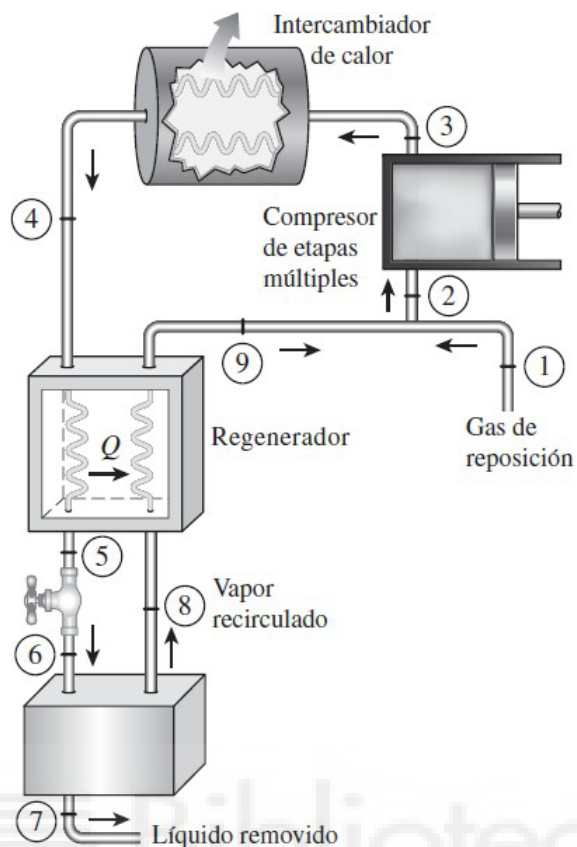


Figura 11. Sistema Linde-Hampson para la licuefacción de gases.[13]

El ciclo de Linde para la licuefacción del hidrógeno consta de tres etapas.

1. Compresión isotérmica. Etapa en la que el hidrógeno se comprime a temperatura ambiente isotérmicamente.
2. Enfriamiento a presión constante. Una vez el hidrógeno se ha comprimido, se enfría a presión constante en un intercambiador de calor.
3. Expansión isoentálpica. El hidrógeno se expande y parte del gas se licua.
4. Recirculación El gas que no se ha licuado, se envía de nuevo al intercambiador para calentarlo y regresar de nuevo al compresor.

Licuar un kilogramo de hidrógeno implica un consumo de energía superior a 30 MJ, lo cual representa aproximadamente el 30-40% de su poder calorífico inferior [5], [8].

Es fundamental almacenar el LOHC evitando al máximo su evaporación. La evaporación del hidrógeno líquido no solo implica una pérdida de la energía invertida en su licuefacción, sino que con el tiempo también supone una disminución en la cantidad de hidrógeno almacenado, ya que el gas evaporado debe ser liberado debido a la presión acumulada en el recipiente de almacenamiento. A este fenómeno de pérdida gradual del hidrógeno almacenado se le conoce como "boil-off", y se expresa como el porcentaje de hidrógeno almacenado que se pierde diariamente, es decir, la tasa de boil-off. Para reducir la transferencia de calor del entorno al hidrógeno líquido almacenado y, por ende, minimizar la tasa de boil-off, se busca disminuir la relación entre la superficie expuesta y el volumen del recipiente de almacenamiento, optando por recipientes con una forma esférica. [11]



Figura 12. Esfera de almacenamiento de hidrógeno líquido.[14]

Los depósitos de LOHC suelen ser de doble capa con vacío entre ellas. El vacío minimiza las pérdidas por conducción y por convección y la distancia entre las paredes del depósito protege de las pérdidas de calor por radiación. Los depósitos de hidrógeno líquido están fabricados con materiales resistentes a la corrosión, como acero inoxidable o aleaciones de aluminio. Para aislar el hidrógeno líquido de la temperatura ambiente, se utilizan capas de aluminio o polímero de aluminio

separadas por fibra de vidrio. Estas capas se sellan al vacío para evitar la transferencia de calor.

El interior del depósito está revestido con materiales de baja conductividad térmica, como fibras de plástico reforzadas con carbono o vidrio. Estos materiales ayudan a mantener el hidrógeno líquido en estado líquido a temperaturas ambiente.

La NASA ha desarrollado una nueva tecnología, denominada *Integrated Refrigeration and Storage (IRAS)*, que hace desaparecer el fenómeno de 'boil-off'.

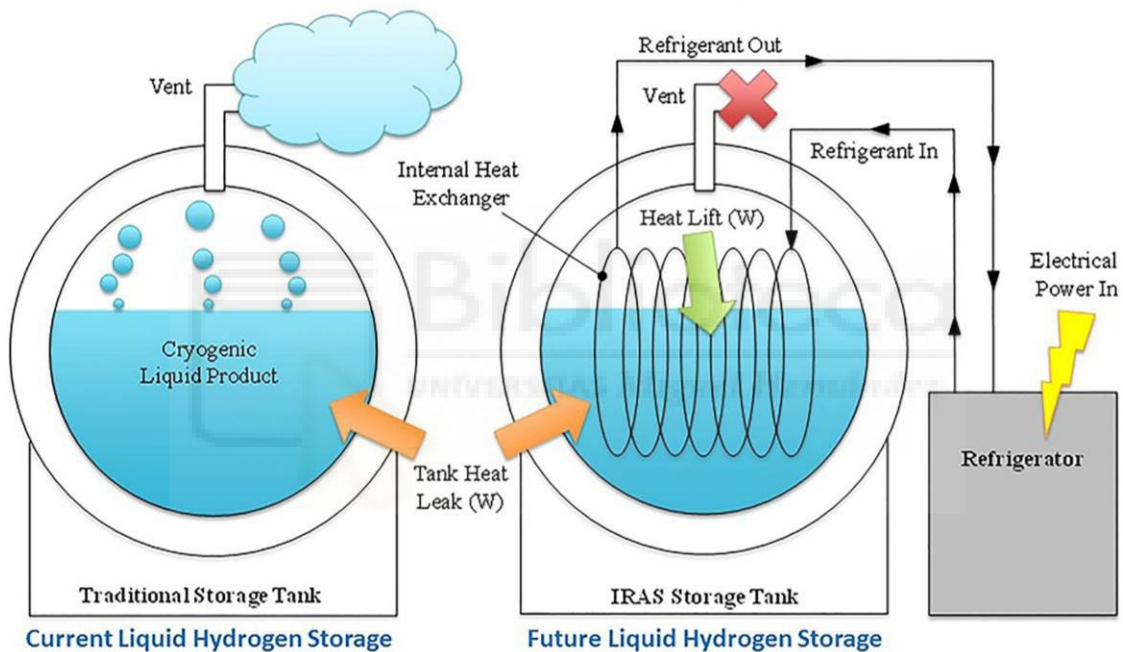


Figura 13. Tecnología IRAS para el almacenamiento de hidrógeno líquido.[14]

Resulta difícil almacenar hidrógeno líquido durante largos periodos de tiempo debido a la dificultad para evitar el 'boil-off' sin necesidad de añadir consumo energético adicional (caso del sistema IRAS). Generalmente, estos depósitos de tienen una pérdida diaria de combustible de en torno al 2%.

El trabajo con depósitos de hidrógeno líquido requiere medidas de seguridad específicas para evitar riesgos relacionados con las bajas temperaturas criogénicas.

Un riesgo importante es el contacto con el hidrógeno líquido, sus vapores o las superficies frías de los recipientes. Esto puede provocar quemaduras frías, congelación e hipotermia.

Otro riesgo es la condensación de aire sobre las superficies de las tuberías que no estén suficientemente aisladas. Esto puede generar atmósferas sobreoxigenadas, que son más propensas a la combustión.

4.1.3. ALMACENAMIENTO EN ESTADO SÓLIDO.

- Hidruros metálicos.

El almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos es una tecnología prometedora para aplicaciones estacionarias, como la generación de energía y el almacenamiento de energía.

Los hidruros metálicos son compuestos químicos que pueden absorber hidrógeno a presiones relativamente bajas, lo que los hace atractivos para el almacenamiento de hidrógeno.

La absorción de hidrógeno en un hidruro metálico es un proceso reversible que se puede llevar a cabo en dos etapas:

- La absorción, que ocurre cuando el hidruro metálico se expone al hidrógeno gaseoso a una presión de 3 a 4 bar.
- La desorción, que ocurre cuando el hidruro metálico se calienta liberando el hidrógeno almacenado.

Los hidruros metálicos tienen varias ventajas sobre otros métodos de almacenamiento de hidrógeno.

- Son seguros: Los hidruros metálicos no son inflamables ni explosivos, lo que los hace seguros para su almacenamiento y transporte.
- Eficientes: Los hidruros metálicos tienen una alta capacidad de almacenamiento de hidrógeno por unidad de volumen, con una densidad gravimétrica de 1,5 a 7,0 kg/m³.
- Durables: Los hidruros metálicos pueden soportar ciclos de carga y descarga repetidos sin perder su capacidad de almacenamiento.

Sin embargo, los hidruros metálicos también tienen algunas desventajas.

- Son pesados: Los hidruros metálicos son más pesados que el hidrógeno gaseoso, con una densidad volumétrica de 0,8 a 1,2 g/cm³.
- Requieren energía: El proceso de desorción requiere energía, lo que reduce la eficiencia energética del sistema.

Para superar estas desventajas, se está investigando una nueva tecnología que implica encapsular partículas de hidruro metálico en una matriz porosa de sílice. Esta matriz porosa permite que el hidrógeno se absorba y desorja fácilmente, mientras que evita la entrada de impurezas que pueden dañar el hidruro metálico. Esta nueva tecnología tiene el potencial de superar las limitaciones de los hidruros metálicos tradicionales, haciéndolos más adecuados para aplicaciones móviles.

Los hidruros metálicos se clasifican en varias categorías[15].

- Los hidruros de base de zirconio con titanio, vanadio y níquel son intersticiales y pueden almacenar hasta un 1,8% en peso de hidrógeno a temperaturas de 60-70°C. Las aleaciones cuasi-cristalinas de Zr-Ti-Ni pueden alcanzar hasta un 3%, pero su reversibilidad no es tan rentable.
- Los hidruros activados de magnesio tienen una capacidad de almacenamiento de hasta un 5-6% en peso de hidrógeno a temperaturas de 260-280°C y 1 bar, aunque su cinética es lenta.

Los hidruros metálicos complejos ligeros, como el alanato de sodio (NaAlH_4), pueden almacenar hasta un 5% de hidrógeno a 80°C y 76 bar, siendo adecuados para su uso en combinación con la electrolisis PEM a 90°C .

Por último, los hidruros químicos son hidróxidos de metales alcalinos y alcalinotérreos que reaccionan con el hidrógeno liberando agua. Para su recuperación, se mezclan con agua en lugar de aplicar calor como en los otros casos.

- *Estructuras de carbono.*

Los materiales de carbono son conocidos por tener propiedades especiales que los hacen adecuados para el almacenamiento de hidrógeno. Estos materiales, como el carbón activo, el grafito y los nanotubos de carbono, tienen una gran área superficial y una estructura porosa que les permite adsorber hidrógeno cuando se someten a presión.

El carbón activo es un material económico y fácilmente disponible en grandes cantidades. Tiene poros con un diámetro menor a 1 nm y una superficie específica de alrededor de $3000 \text{ m}^2/\text{g}$. Sin embargo, a temperatura ambiente y presión moderada, la cantidad de hidrógeno adsorbido es baja, generalmente menos del 1% en peso bajo condiciones de 100 bar y 25°C .

El grafito, por su parte, presenta una capacidad de almacenamiento limitada debido a la distancia entre sus capas y su baja área superficial. Sin embargo, es posible aumentar su área superficial mediante la molienda en un molino de bolas. Después de someterlo a una molienda de 80 horas a 10 bares de presión, se logra una adsorción de hidrógeno del 7,4% en peso, y aproximadamente el 80% de este hidrógeno puede ser liberado a temperaturas superiores a 300°C .

Los nanotubos de carbono son estructuras formadas por láminas de grafito enrolladas en forma de tubo. Hay dos tipos principales de nanotubos: los de pared simple (SWNT) y los de pared múltiple (MWNT). Los SWNT son tubos individuales con diámetros que van desde 0,7 nm hasta varios nanómetros. En

los SWNT, los átomos de hidrógeno se depositan dentro de los tubos, y su capacidad de almacenamiento es inferior al 1% en peso en condiciones atmosféricas y puede llegar hasta el 2,4% en condiciones criogénicas.

Por otro lado, los MWNT consisten en múltiples tubos concéntricos con diámetros de 30 a 50 nm, similar a la separación entre las capas de grafito. En estos nanotubos, se produce una quimisorción entre las paredes de los tubos, lo que se estima que les permite almacenar alrededor del 7,7% en peso de hidrógeno. Sin embargo, la adición de potasio y litio mejora su capacidad de adsorción, alcanzando el 20% en peso cuando se dopa con litio a 380 °C, y el 14% en peso cuando se dopa con potasio a temperatura ambiente, aunque estos últimos nanotubos pueden incendiarse al entrar en contacto con el aire.

En general, los nanotubos de carbono multicapa parecen ser una opción prometedora para el almacenamiento de hidrógeno, aunque aún se encuentran en proceso de desarrollo y requieren más investigaciones. La figura 6-4 muestra una representación idealizada de la adsorción de hidrógeno en nanotubos de pared simple.



5. DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO.

En este capítulo se desarrollan las diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno: en estado criogénico, en estado de gas comprimido y en estado sólido

5.1. INTRODUCCIÓN.

Dentro de la cadena de valor del hidrógeno, uno de los elementos que supone un mayor reto es el desarrollo de su infraestructura de distribución. La utilización extendida de hidrógeno requiere el desarrollo de una nueva infraestructura de distribución en lo que será clave poder adaptar otras infraestructuras ya existentes.

La infraestructura de distribución debe definir las instalaciones y el equipamiento requerido para llevar el hidrógeno desde sus puntos de producción hasta los consumidores finales. El estado en el que se transporte y el consumidor final, condicionarán totalmente los elementos de la infraestructura que se utilicen para su distribución.

De acuerdo con lo desarrollado en los capítulos anteriores [3.1], el hidrógeno puede ser transportado en tres estados: como gas comprimido, líquido criogénico o sólido. La elección del método de transporte estará condicionada por la cantidad de hidrógeno a transportar y la distancia a su destino.

El hidrógeno para uso industrial se transporta típicamente como gas comprimido a baja presión (6-20 barg) o a alta presión (200-350 barg). También puede ser transportado como hidrógeno líquido a través de gaseoductos o por carretera en camiones cisterna y tanques criogénicos. También se utiliza el ferrocarril para el transporte de hidrógeno, aunque representa una cantidad muy pequeña respecto al resto de transportes utilizados.

Ya se ha visto que tanto la licuación como la compresión del hidrógeno requieren del uso de mucha energía [4] lo que afecta de forma significativa al coste total de distribución. Las estrategias de producción de hidrógeno pueden afectar de manera importante al costo y al método de distribución. Si la producción de hidrógeno se centraliza en una ubicación, los costes de su distribución aumentarán significativamente. Por otro lado, si el hidrógeno se produce en el

punto de uso, los costes de transporte serán minimizados, pero los costes de producción aumentarán debido a la pérdida de los beneficios de producción a gran escala.

Teniendo todo esto en cuenta, el método de transporte de hidrógeno más económico dependerá de una serie de factores, incluida la cantidad de hidrógeno que se transporte, la distancia a la que se transporte y la estrategia de producción de hidrógeno.

5.2. TRANSPORTE DE HIDRÓGENO COMO GAS COMPRIMIDO.

5.2.1. POR MAR MEDIANTE GASODUCTOS.

SITUACIÓN ACTUAL Y BENEFICIOS DE SU UTILIZACIÓN.

Actualmente en España se permite distribuir hidrógeno a través de los gaseoductos existentes mediante 'blending' en forma de biometano debido a que posee unas características muy similares a las del gas natural.

La cantidad de hidrógeno que se puede inyectar en la red de gaseoductos varía según el país. Como se puede ver en la Figura 14, España tiene uno de los límites más bajos. Esto se debe a que la infraestructura de gas natural de España no está preparada para manejar grandes cantidades de hidrógeno.



Figura 14. Límites regulatorios de mezcla de hidrógeno. [16]

Entre los beneficios de utilizar gaseoductos para la distribución del hidrógeno destacan:

- **Eficiencia:** Los gasoductos son una forma de transporte eficiente de hidrógeno. Pueden transportar grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias con poca pérdida de energía.
- **Coste:** Los gasoductos son una forma de transporte económico de hidrógeno. El coste de construir y operar un gasoducto es relativamente bajo.
- **Seguridad:** Los gasoductos son una forma de transporte seguro de hidrógeno.

UTILIZACIÓN DE GASEODUCTOS EXISTENTES Y CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS GASEODUCTOS.

El hidrógeno puede causar fragilización del acero, lo que puede debilitar las tuberías y hacerlas más propensas a romperse (ver 0). Además, puede permear a través de las paredes de las tuberías, lo que puede provocar fugas. Utilizar los gaseoductos existentes para transportar hidrógeno puro no sería viable sin grandes modificaciones estructurales.

Recientes estudios, realizados por la Universidad Politécnica de Cataluña, concluyen que la mayoría de los gasoductos podrían tolerar un 10% de hidrógeno mediante blending sin requerir adaptación o incluso un 20% con un coste de adaptación razonable a medio plazo.



Figura 15. Red de gasoductos de España.[17]

Para los nuevos gasoductos de hidrógeno, existe un fuerte potencial para utilizar tuberías de termoplástico reforzado (RTP), ya que las RTP se pueden obtener en longitudes mucho más largas que las de acero y el costo de instalación de las tuberías RTP es aproximadamente un 20% más barato.

CONDICIONES DEL HIDRÓGENO PARA SU TRANSPORTE EN GASODUCTOS.

Las condiciones de presión para transportar hidrógeno por un gasoducto de hidrógeno varían en función de la distancia del transporte, el diámetro de la tubería y las propiedades del hidrógeno. En general, el hidrógeno se transporta a presiones más altas que el gas natural, ya que es una molécula más pequeña y volátil.

Las presiones típicas de transporte de hidrógeno son de 200 a 700 bar (3000 a 10,000 psi). Sin embargo, en algunos casos, se pueden utilizar presiones aún más altas, de hasta 1000 bar (15,000 psi).

Las altas presiones utilizadas para el transporte de hidrógeno son necesarias para reducir el volumen del gas y para evitar fugas. El hidrógeno es una molécula muy pequeña y puede escapar fácilmente a través de los poros de las tuberías. Las altas presiones ayudan a mantener el hidrógeno dentro de las tuberías y a prevenir fugas.

El transporte de hidrógeno a altas presiones también tiene algunos inconvenientes. Las altas presiones pueden aumentar los costes de transporte y pueden hacer que el gasoducto sea más susceptible a accidentes. Sin embargo, los beneficios de transportar hidrógeno a altas presiones superan los inconvenientes. El transporte de hidrógeno a altas presiones permite el transporte de grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias de forma segura y eficiente.

Ventajas
Permite el transporte de grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias.
Es más eficiente que el transporte de hidrógeno a baja presión.
Es más seguro que el transporte de hidrógeno a baja presión.
Es más fácil de controlar que el transporte de hidrógeno a baja presión.
Desventajas
Aumenta los costes de transporte.
Hace que el gasoducto sea más susceptible a accidentes.
Puede requerir el uso de materiales especiales para las tuberías.
Puede requerir el uso de válvulas y otros equipos especiales.

En general, las ventajas de transportar hidrógeno a altas presiones superan las desventajas. El transporte de hidrógeno a altas presiones permite el transporte de grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias de forma segura y eficiente.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del transporte de hidrógeno a alta presión.

5.2.2. POR CARRETERA.

Los camiones de tubos son vehículos que están equipados con varios cilindros de acero para almacenar el hidrógeno.

Utilizan la tecnología de cilindros descrita en descrita en el apartado 4.1.1. Los cilindros están montados en un marco protector y la presión de almacenamiento varía según el tipo de cilindro (ver Tabla 2Tabla 2.Clasificación depósitos almacenamiento hidrógeno comprimido (CGH2).).



Figura 16. Transporte de hidrógeno por carretera en cilindros.[18]

5.3. TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LÍQUIDO.

5.3.1. POR MAR.

El transporte por mar de hidrógeno líquido se puede realizar mediante la utilización de buques gaseros. En la actualidad, existen numerosos proyectos de construcción de buques para transporte de hidrógeno. Algunos ya se han

materializado, como el buque Suiso Frontier construido por el astillero japonés Kawasaki Heavy Industries (KHI) .



Figura 17. Buque gasero Suiso Frontier.

El hidrógeno se almacena en estado líquido a una temperatura que se sitúa en torno a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. La cantidad de hidrógeno que se puede almacenar varía según el buque, los primeros buques de este tipo tienen en torno a 1200 m^3 de capacidad, aunque los últimos proyectos presentados son más ambiciosos. Estos buques están equipados con tanques de almacenamiento de estructuras con doble pared y aislamiento al vacío para minimizar las pérdidas por evaporación. La evaporación flash en los buques se estima de $0,2\text{ - }0,4\%/día$

5.3.2. POR CARRETERA.

El transporte de hidrógeno líquido por carretera se realiza en camiones con depósitos criogénicos. Están equipados con aislamientos multipared, son capaces de transportar entre 3000 y 9000 litros haciendo que tengan mucha mayor capacidad que los camiones de transporte en forma de gas comprimido. Presentan unas tasas de evaporación flash de entre $0,3\text{ - }0,6\%/día$.



Figura 18. Camión cisterna de transporte de hidrógeno líquido PLUG.

5.4. TRANSPORTE DE HIDRÓGENO EN ESTADO SÓLIDO.

El transporte de hidrógeno en estado sólido, bajo el desarrollo actual, no parece una solución práctica para la distribución de este. Uno de los principales inconvenientes del hidrógeno en estado sólido es su peso. Por ejemplo, la capacidad de almacenamiento de los hidruros metálicos es de unos 1,5 kg de H₂ (o 50 kWh) por cada 100 kg de material compuesto de hidruros metálicos.



6. MARCO NORMATIVO.

En este capítulo se analiza el marco normativo aplicable al almacenamiento y la distribución del hidrógeno en España.

6.1. MARCO NORMATIVO DEL ALMACENAMIENTO.

El almacenamiento de hidrógeno se puede realizar en el lugar de producción o en el lugar de consumo.

6.1.1. ALMACENAMIENTO EN LUGAR DE PRODUCCIÓN.

El almacenamiento en el lugar de producción está regulado por el Reglamento de Equipos a Presión [19] y el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos [20] junto a las instrucciones complementarias MIE de APQ 0 a APQ 10 [20].

6.1.2. ALMACENAMIENTO EN LUGAR DE CONSUMO.

El almacenamiento en el lugar de consumo se puede realizar en estaciones de servicio, establecimientos industriales o residencias o a bordo del propio consumidor final (ejemplo: vehículos).

El almacenamiento en estaciones de servicio está regulado por el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11 [21].

El almacenamiento en establecimientos industriales no requiere desarrollo regulatorio, ya que está recogido en la APQ-5 [20].

El almacenamiento de hidrógeno para uso residencial requiere una regulación específica para garantizar la seguridad. El Ministerio de Industria y Turismo de España propone incluirlo dentro del ámbito de aplicación del Reglamento Técnico de Distribución y Utilización de Combustibles Gaseosos, con una nueva instrucción técnica complementaria específica. Esta propuesta se basa en las similitudes entre el hidrógeno y otros combustibles gaseosos en términos de seguridad.

Si el hidrógeno se almacena a bordo de vehículos impulsados por hidrógeno, los requisitos de almacenamiento vienen definidos en el Reglamento CE Nº79/ 2009 [22] relativo a la homologación de los vehículos de motor impulsados por hidrógeno. Para los depósitos, fija los siguientes requisitos:

- Depósitos de hidrógeno líquido. Se establecen requisitos para la homologación de los depósitos relativos a ensayos a realizar: ensayo de rotura, ensayo de inflamación, ensayo de nivel máximo, ensayo de presión y ensayo de fugas.
- Depósitos de hidrógeno gaseoso comprimido. Siguiendo los tipos de depósitos a presión para su uso con hidrógeno definidos en el punto 4.1.1, se establecen los siguientes requisitos para su homologación:

Tipo de ensayo	Aplicabilidad según tipo			
	I	II	III	IV
<i>Rotura</i>	X	X	X	X
<i>Ciclos de presión a temperatura ambiente</i>	X	X	X	X
<i>Fugas antes de la rotura</i>	X	X	X	X
<i>Inflamación</i>	X	X	X	X
<i>Penetración</i>	X	X	X	X
<i>Exposición química</i>		X	X	X
<i>Tolerancia a las grietas</i>		X	X	X
<i>Rotura acelerada por esfuerzos</i>		X	X	X
<i>Ciclos de presión a temperatura extrema</i>		X	X	X
<i>Daños por impacto</i>			X	X
<i>Fugas</i>				X
<i>Permeabilidad</i>				X
<i>Torsión</i>				X
<i>Ciclos de gas hidrógeno</i>				X

Tabla 4. Ensayos para homologación de depósitos de hidrógeno gaseoso comprimido de vehículos propulsados por hidrógeno.

En [22] se definen las condiciones de superación de los ensayos.

6.2. MARCO NORMATIVO DE DISTRIBUCIÓN.

6.2.1. POR CARRETERA.

La distribución del hidrógeno por carretera está regulada por el ADR [23]. El ADR (*Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route*) es un acuerdo internacional que regula el transporte de mercancías peligrosas por carretera. Establece las disposiciones para el transporte seguro de mercancías peligrosas, incluidas las condiciones de embalaje, etiquetado, y transporte.


Para el hidrógeno líquido, hidrógeno comprimido o transportado disuelto en hidruros, el ADR da la siguiente clasificación.

<i>N.º ONU</i>	1049	1966	3468
<i>Nombre y descripción</i>	HIDRÓGENO COMPRIMIDO	HIDRÓGENO LÍQUIDO REFRIGERADO	HIDRÓGENO EN UN DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO CON HIDRURO METÁLICO
<i>Clase</i>	2	2	2
<i>Código de clasificación</i>	1F	3F	1F
<i>Grupo de embalaje</i>			
<i>Etiquetas</i>	2.1	2.1	2.1
<i>Disposiciones especiales</i>	392 662		321 356
<i>Cantidades limitadas y exceptuadas</i>	0	0	0
	E0	E0	E0
<i>Embalaje</i>	P200	P203	P205
	MP9	MP9	MP9
	(M)	T75	

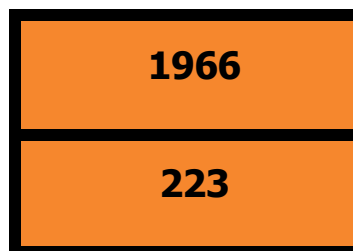
<i>N.º ONU</i>	1049	1966	3468
<i>Nombre y descripción</i>	HIDRÓGENO COMPRIMIDO	HIDRÓGENO LÍQUIDO REFRIGERADO	HIDRÓGENO EN UN DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO CON HIDRURO METÁLICO
<i>Cisternas portátiles y contenedores para granel</i>		TP5 TP34	
<i>Cisternas ADR</i>	CxBN(M)	RxBN	
	TA4 TT9	TU18 TE26 TA4 TT9	
<i>Vehículos para transporte en cisternas</i>	FL	FL	
<i>Categoría de transporte (Código de restricción en túneles)</i>	2 (B/D)	2 (B/D)	2 (D)
<i>Disposiciones especiales de transporte</i>		V5	
	CV9 CV10 CV36	CV9 CV11 CV36	CV9 CV10 CV36
	S2 S20	S2 S17	S2 S20
<i>Número de identificación de peligro</i>	23	223	

Tabla 5. Clasificación de hidrógeno y requisitos en ADR para transporte por carretera.

Interpretando los puntos generales de la tabla, sobre el caso de hidrógeno líquido, estaríamos ante un material de clase 2., aplicando etiquetas 2.1:

Etiquetas y paneles de peligro	Características del peligro	Indicaciones suplementarias
 <p style="text-align: center;">2.1</p>	<p>Riesgo de incendio.</p> <p>Riesgo de explosión. Puede estar bajo presión. Riesgo de asfixia.</p> <p>Puede provocar quemaduras y/o congelación.</p> <p>Los dispositivos de confinamiento pueden explotar bajo los efectos del calor</p>	<p>Refugiarse.</p> <p>Mantenerse lejos de zonas bajas</p>

El vehículo, en base a la mercancía que transporta, deberá de llevar el panel que identifica el material y sus peligros. Por ejemplo, para el caso del hidrógeno líquido quedaría:



En donde 1966 indica en número ONU del material y el 223 indica el peligro de gas licuado refrigerado inflamable.

La cisterna para el transporte será tipo RxBN que se trata de una cisterna para gases licuados refrigerados, con aberturas de llenado o vaciado por el fondo con tres cierres y con válvula de seguridad.

6.2.2. POR MAR.

El marco normativo para el transporte de hidrógeno en buques se basa en el Código Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG Code) [24]. El IMDG Code es un documento internacional que establece las disposiciones para el transporte seguro de mercancías peligrosas por mar. El IMDG Code se aplica en todos los países miembros de la Organización Marítima Internacional (OMI).

<i>N.º ONU</i>	1049	1966	3468
<i>Nombre y descripción</i>	HIDRÓGENO COMPRIMIDO	HIDRÓGENO LÍQUIDO REFRIGERADO	HIDRÓGENO EN UN DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO CON HIDRURO METÁLICO
<i>Clase</i>	2.1	2.1	2.1
<i>Peligros secundarios</i>			
<i>Grupo de embalaje/envase</i>			
<i>Disposiciones especiales</i>	392 662		321 356
<i>Cantidades limitadas y exceptuadas</i>	0	0	0
	E0	E0	E0
<i>Embalaje/envasado</i>	P200	P203	P205
<i>RIG</i>			
<i>Cisternas portátiles y contenedores a granel</i>		T75	
		TP5 TP34	
<i>FEm</i>	F-D, S-U	F-D, S-U	F-D, S-U

<i>N.º ONU</i>	1049	1966	3468
<i>Nombre y descripción</i>	HIDRÓGENO COMPRIMIDO	HIDRÓGENO LÍQUIDO REFRIGERADO	HIDRÓGENO EN UN DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO CON HIDRURO METÁLICO
<i>Estiba y manipulación</i>	Categoría E SW2	Categoría D SW2	Categoría D
<i>Segregación</i>	SG46	SG46	

Tabla 6. Clasificación de hidrógeno y requisitos de IMDG Code para transporte por mar

Como se observa en la tabla, muchos datos son comunes al ADR. Los asuntos particulares a los buques, tomando como ejemplo el hidrógeno líquido:

- Las cisternas deben de cumplir con los requisitos asociados al T75, TP5 y TP34 según aplique [24], las cuales referencian a requisitos funcionales de las cisternas.
- Código de estiba SW2 que fija que el material se transportará a una temperatura regulada. Además, está en categoría D lo que hace que el buque no pueda exceder de 25 pasajeros o un pasajero cada 3 metros de eslora total.
- Segregación SG46, que requiere que el material sea estibado separado del cloro.



7. CONCLUSIONES

La logística del hidrógeno es un campo en rápido desarrollo a medida que el hidrógeno se convierte en una fuente de energía más importante. Los avances en la tecnología de producción, transporte y almacenamiento del hidrógeno están ayudando a reducir los costes y aumentar la eficiencia del hidrógeno, lo que hace que sea más competitivo como fuente de energía.

Con todo lo visto durante el trabajo, la logística del hidrógeno queda de acuerdo con la Figura 19.







Figura 19. Logística del hidrógeno.

Para determinar la mejor manera de transportar y almacenar hidrógeno, se deben considerar varios factores, como:






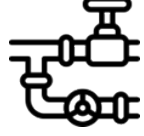

- La cantidad de hidrógeno producido y consumido en cada punto.
- La distancia entre la planta de producción y los puntos de consumo.
- La compatibilidad de los usos finales.
- La idoneidad para el acondicionamiento final.
- El uso en los diferentes tipos de consumos.

En función de estos factores, las alternativas disponibles para el hidrógeno obtenido son gaseoductos, camiones y buques cisterna, almacenamiento líquido y almacenamiento gaseoso comprimido.

Se ha elaborado un cuadro de decisión (Figura 20) para seleccionar, en función de la cantidad de hidrógeno a transportar y la distancia al destino, la alternativa más interesante desde el punto de vista económico (\$/kg de hidrógeno transportado).

Volumen (ton/día)	Distancia (km)	Método de transporte	Estado del hidrógeno	Coste (\$/kg)
0-1	1-10	Camiones 	Comprimido	0.65 - 0.76
	10-100	Camiones 	Comprimido	0.68 - 1.73
	100-1000	Camiones 	Comprimido	0.96 - 3.87
	1000-3500	Camiones 	Líquido	3.87 - 6.70

ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO

Volumen (ton/día)	Distancia (km)	Método de transporte	Estado del hidrógeno	Coste (\$/kg)
1-10	1-10	Camiones 	Comprimido	0.65 – 0.76
	10-100	Camiones 	Comprimido	0.68 – 1.73
	100-1000	Camiones 	Comprimido	0.96 – 3.87
	1000-3500	Camiones 	Líquido	3.87 – 6.70
10-100	1-10	Gaseoductos 	Comprimido	0.05 – 0.06
	10-100	Gaseoductos 	Comprimido	0.06 – 0.22
	100-1000	Gaseoductos 	Comprimido	0.22 – 1.82
	1000-2500	Gaseoductos	Comprimido	1.82 - 3

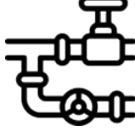
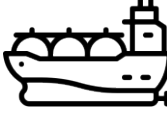
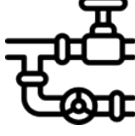



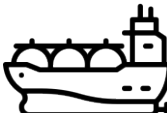
Volumen (ton/día)	Distancia (km)	Método de transporte	Estado del hidrógeno	Coste (\$/kg)
				
	>2500	Buques 	Líquido	>3
100-1000	1-10	Gaseoductos 	Comprimido	0.05
	10-100	Gaseoductos 	Comprimido	0.05 – 0.10
	100-1000	Gaseoductos 	Comprimido	0.10 – 0.58
	1000-4500	Gaseoductos 	Comprimido	0.58 - 3
	>4500	Buques 	Líquido	>3

Figura 20. Coste por kg de transporte de hidrógeno en función de volumen transportado y distancia al destino. Elaboración propia a partir de [25]



8. BIBLIOGRAFÍA.



8.1. REFERENCIAS.

- [1] S. Potter, «nasa.gov», *NASA*, 13 de enero de 2022.
<http://www.nasa.gov/press-release/el-2021-empata-como-el-sexto-a-o-m-s-c-lido-en-la-tendencia-de-calentamiento-seg-n-un> (accedido 8 de diciembre de 2022).
- [2] «<http://agrega.juntadeandalucia.es/>».
http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/31052010/c4/es-an_2010053113_9093818/ODE-28971505-8067-3f41-ade9-9e5c90422556/33_energa_quimica.html (accedido 31 de agosto de 2023).
- [3] «IEA – International Energy Agency», *IEA*. <https://www.iea.org> (accedido 31 de agosto de 2023).
- [4] Martínez Amaya, Sofía María y Ramírez Dilas, Víctor Emmanuel, «Producción de Energía Eléctrica y Gas de Síntesis a Partir de la Electrólisis del Agua con Energía Solar y uso del Co₂».
- [5] «USA Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (HFTO)».
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office>
- [6] «Genia Bioenergy | Expertos en Biogás y Biometano»,
<https://geniabioenergy.com/>. <https://geniabioenergy.com/> (accedido 31 de agosto de 2023).
- [7] «Hidrógeno y su almacenamiento. El futuro de la energía eléctrica».
 Universidad de A Coruña, 2021. [En línea]. Disponible en:
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/27268/Aguado_Molina_2021_Hidrogeno_y_su_almacenamiento.pdf?sequence=3
- [8] LLERA SASTERA, EM; ZABALZA BRIBIÁN, I., *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos*, *Prensas Universitarias de Zaragoza*, 1ª edición, Zaragoza, 2011.
- [9] «Seguridad CNH₂», *Centro Nacional de Hidrógeno*.
<https://www.cnh2.es/seguridad/> (accedido 31 de agosto de 2023).

- [10] H. Li *et al.*, «Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges», *Energy Reports*, vol. 8, pp. 6258-6269, nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.04.067.
- [11] L. Pérez, «Métodos de almacenamiento del hidrógeno | SynerHy». <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/> (accedido 31 de agosto de 2023).
- [12] «Air Liquide España - Gases industriales». <https://es.airliquide.com/> (accedido 31 de agosto de 2023).
- [13] Yunes A Cengel; Michael A Boles, *Termodinámica*.
- [14] Bob Granath, «NASA Innovative Liquid Hydrogen Storage to Support Space Launch System». <https://www.nasa.gov/feature/innovative-liquid-hydrogen-storage-to-support-space-launch-system>
- [15] G. Walker, *Solid-State Hydrogen Storage: Materials and Chemistry*. Elsevier, 2008.
- [16] Juan Ramón Morante, Teresa Andreu, Gotzon García, Jordi Guilera, Albert Tarancón, y Marc Torrell, *Hidrógeno Vector de una economía descarbonizada*, 2º edición. Madrid: Publicaciones de Fundación Naturgy.
- [17] Enagás, «Gasoductos - Infraestructuras Energéticas - Enagás». <https://www.enagas.es/es/transicion-energetica/red-gasista/infraestructuras-energeticas/red-transporte/gasoductos/> (accedido 31 de agosto de 2023).
- [18] «Air Liquide España - Gases industriales». <https://es.airliquide.com/> (accedido 10 de diciembre de 2022).
- [19] Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, *Real Decreto 809/2021, de 21 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias*, vol. BOE-A-2021-16407. 2021, pp. 123437-123574. Accedido: 31 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/09/21/809>
- [20] «BOE-A-2017-8755 Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10.»

- <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-8755> (accedido 31 de agosto de 2023).
- [21] «BOE-A-2006-15345 Real Decreto 919/2006, de 28 de julio, por el que se aprueba el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11.» <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2006-15345> (accedido 31 de agosto de 2023).
- [22] «BOE.es - DOUE-L-2009-80212 Reglamento (CE) nº 79/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de enero de 2009, relativo a la homologación de los vehículos de motor impulsados por hidrógeno y que modifica la Directiva 2007/46/CE.» <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2009-80212> (accedido 31 de agosto de 2023).
- [23] «ADR 2023 | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana». https://www.mitma.es/transporte-terrestre/mercancias-peligrosas-y-perecederas/adr_2023 (accedido 31 de agosto de 2023).
- [24] Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, *Enmiendas de 2020 al Código marítimo internacional de mercancías peligrosas (Código IMDG) adoptadas en Londres el 11 de noviembre de 2020 mediante la Resolución MSC.477(102)*, vol. BOE-A-2022-10449. 2022, pp. 87415-88424. Accedido: 31 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.boe.es/eli/es/ai/2020/11/11/\(2\)](https://www.boe.es/eli/es/ai/2020/11/11/(2))
- [25] Bloomberg NEF, *Hydrogen Economy Outlook*. 2020.