

Estado del arte de los materiales utilizados para el transporte y
almacenamiento de Hidrógeno

Vianny Mildred Peña Niño
Juan Sebastián Prada Oróstegui

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico

Director
Darío Yesid Peña Ballesteros
Doctor en Corrosión

Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ingenierías Físicoquímicas
Escuela De Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
Ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales
Bucaramanga
2023

Dedicatoria

A mi amado papá, cuyo espíritu y enseñanzas continúan guiándome a pesar de su ausencia física. A mamá, mi roca inquebrantable, agradezco tu amor y apoyo constante. A mi querida hermana y hermano, cómplices inseparables en este viaje llamado vida. A mi abuela, fuente inagotable de sabiduría y cariño, gracias por iluminar mi camino con tus consejos.

A mi familia, pilar fundamental en mi vida, agradezco su constante apoyo y amor. A mis adorables perritos, compañeros leales, quienes han llenado mis días de alegría y compañía. A mis leales amigos, cuya amistad es mi mayor tesoro, han compartido risas y lágrimas.

Al profesor Darío Peña, mi gratitud por su dedicación y orientación, fundamentales en mi formación académica. A la incansable secretaria Patricia, cuya ayuda constante y amabilidad ha aligerado este proceso.

A Kevin Arana y su familia, cuyo apoyo incondicional ha sido un faro en los momentos difíciles. A mi compañero de tesis, Juan Sebastián Prada, gracias por tu colaboración y amistad en este proyecto compartido.

Este logro no habría sido posible sin cada uno de ustedes. Su presencia ha dejado una huella imborrable en mi trayectoria, y les dedico este éxito con profundo agradecimiento por ser parte fundamental de mi camino.

Att: Vianny Mildred Peña Niño.

Primero que todo, dar las gracias a Dios y a mis padres Pedro Nel Prada Avendaño y Ligia Oróstegui Chacón, por la oportunidad de estar con ellos durante todo el proceso que me ha traído hasta este punto, y con los que espero seguir compartiendo por mucho más tiempo.

A Emilio, a Jhoon Reyes y a mi hermana Angélica María Prada Oróstegui por ser las personas que mejores consejos da, no solo a nivel personal sino a nivel profesional, y por también ser una excelente compañía cada vez que ella podía hacerse presente.

A toda mi familia, en especial a mi Tía Alba y mi Tía Patricia por haberme ayudado a nivel personal, y también a mis papás en todas las batallas que nos ha tocado hasta el día de hoy.

Me quedo corto para darle las gracias a todas las personas que he conocido a lo largo de la carrera, ellos sabrán quienes son y fueron personas que nunca voy a olvidar y espero que sigan compartiendo conmigo por mucho tiempo.

A mis amigos de toda la vida Karlos Mario, Luis Alfredo, Hans Taylor y Carlos Julio por seguir con esta amistad desde que nos conocimos en el colegio y con quién todavía compartimos momentos, y fueron gran apoyo para mi formación como persona

Al profesor Pedro Luis Delvasto Angarita agradecerle que me haya dejado compartir con él sus enseñanzas para los estudiantes de primer semestre y apoyarlo en el tiempo que compartimos en distintos temas de los que él requería mi ayuda.

Y a mi compañera de tesis, Vianny Peña, la conocí solo hace 2 años, pero fue una persona muy importante para el final de mi carrera y con quien me siento orgulloso de haber hecho este proyecto.

Att: Juan Sebastián Prada Oróstegui.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por la formación integral que nos han ofrecido y ha hecho de nosotros unas mejores personas.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por acogernos desde el primer día de nuestra vida universitaria, y brindarnos de manera tanto teórica como práctica experiencias que siempre van a quedar en nuestra mente y en nuestros corazones.

A todos los profesores y técnicos de laboratorio que nos acompañaron en toda nuestra enseñanza académica, que sigan haciendo grande nuestra carrera y los logros sigan llegando en los años siguientes.

A Patricia, por ser de las mejores personas que han conocido en la escuela y siempre estar con nosotros, los estudiantes, ayudándonos en los momentos importantes.

Finalmente, a nuestro director de Tesis, el profesor Darío Yesid Peña Ballesteros por acompañarnos en esta etapa final del proyecto y aportar a que esta etapa sea de final feliz.

Tabla de Contenido

Introducción.....	11
1.1. Contexto y Justificación.....	11
1.2. Objetivos de la Tesis.	11
1.2.1. Objetivo general.....	11
1.2.2. Objetivos específicos.....	11
1.3. Metodología.....	12
1.3.1. Identificación del tema.....	12
1.3.2. Exploración y revisión de documentos.....	12
1.3.3. Selección y filtración de la información.....	12
1.3.5. Análisis de la información.....	12
1.3.6. Identificación de avances y desafíos.....	12
1.3.7. Socialización de resultados e informe final.....	13
2. Fundamentos del Hidrógeno como fuente de energía.....	13
2.1. Propiedades del Hidrógeno.....	13
2.1.1 Características Físicoquímicas.....	13
2.2. Importancia del hidrógeno en la transición energética.....	14
2.2.1 Reducción de Emisiones de Carbono.....	14
2.2.2 Almacenamiento y Distribución de Energía Intermitente.....	14
2.2.3 Diversificación Energética.....	15
2.2.4 Estímulo a la Innovación Tecnológica.....	15
2.3. Aplicaciones del hidrógeno.....	16
3. Identificación de Materiales para el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.....	17
3.1. Utilización de Metales en el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.....	18
3.2 Compuestos Orgánicos.....	19
3.3. Aleaciones de Aluminio en el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.....	19
3.4 Materiales Nanoestructurados: Mejora de Superficies y Cinética.....	20
3.5. Polímeros en el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.....	21
3.6. Utilización de CFRP en el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.....	22
3.7. Utilización de Materiales Híbridos en el Contexto del Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.....	22
4. Tipos de almacenamiento de Hidrógeno.....	23
4.1. Almacenamiento de Hidrógeno en Forma Gaseosa: Consideraciones y Perspectivas.	23
4.2 Almacenamiento de Hidrógeno en Forma Líquida: Optimización de la Densidad Energética.....	24

4.3 Almacenamiento de Hidrógeno en Sólidos: Innovación en la Captura Molecular.	25
4.4 Almacenamiento de Hidrógeno en Nanomateriales: Avances en la Capacidad de Almacenamiento a Escala Nanométrica.	26
4.5 Almacenamiento de Hidrógeno en Líquidos Orgánicos: Innovación en el Transporte y Almacenamiento Eficiente.	26
4.6 Almacenamiento de Hidrógeno en Forma de Portadores Químicos: Investigación de Soluciones para el Transporte y Almacenamiento.	27
4.7 Evaluación de la Seguridad en el Almacenamiento de Hidrógeno: Análisis y Gestión de Riesgos.	28
4.8. Comparación de los Métodos de Almacenamiento de Hidrógeno.	29
5. Efectos del Hidrógeno en las Propiedades de los Materiales para el Transporte y Almacenamiento.	31
5.1. Cambios Estructurales y Cristalográficos.	31
5.2. Propiedades de Absorción y Desorción de Hidrógeno.	32
6. Materiales Apropriados para el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.	33
6.1. Requisitos y criterios para la selección de materiales.	34
6.2. Ejemplos de materiales óptimos.	34
6.2.1. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno a Alta Presión.	35
6.2.2. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno Sólido: Innovación en el Almacenamiento Seguro.	35
6.2.3. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno en Nanotubos de Carbono: Exploración de su Potencial Nanotecnológico.	36
6.2.4. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno en Nanopartículas de Metal: Avanzando en el Almacenamiento a Escala Nanométrica.	37
6.2.5. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno en Zeolitas: Innovación en la Captura Molecular de Hidrógeno.	38
6.3. Tubos de transporte.	38
6.4. Almacenamiento sólido de hidrógeno.	39
6.5. Discusión de Resultados.	41
7. Conclusiones.	41
8. Recomendaciones.	43
Referencias Bibliográficas	44

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Densidad Energética de distintos combustibles	17
Tabla 2. Comparación de los métodos de Almacenamiento mediante ciertos factores.	29
Tabla 3. Resumen de los resultados.	40
Tabla 4. Discusiones sobre los materiales analizados.	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Política de Hidrógeno en ciertos países.....	17

Resumen

Título: Estado del arte de los materiales utilizados para el transporte y almacenamiento de Hidrógeno*

Autor: 2172801- Vianny Mildred Peña Niño, 2183304- Juan Sebastián Prada Oróstegui

**

Palabras Clave: Hidrógeno, transporte, almacenamiento, materiales, propiedades.

Descripción: La investigación titulada "Estado del arte de los materiales utilizados para el transporte y almacenamiento del hidrógeno" se propone estudiar sobre los materiales empleados en las distintas fases del proceso de transporte y almacenamiento del hidrógeno. El objetivo general de este estudio consiste en llevar a cabo un análisis mediante una revisión bibliográfica, que permita comprender y evaluar los avances, desafíos y desarrollos recientes en este campo crucial para la tecnología del hidrógeno.

Entre los objetivos específicos que guiarán esta investigación, se encuentra en primer lugar la identificación de los materiales actualmente utilizados en el transporte y almacenamiento de hidrógeno. Esto implica abordar tanto los materiales convencionales como aquellos de última generación que han surgido como resultado de la investigación y desarrollo continuos en esta área.

Además, se llevará a cabo un análisis detallado de los efectos que el hidrógeno ejerce sobre las propiedades fisicoquímicas de los materiales empleados. Este aspecto reviste gran importancia, ya que el hidrógeno, en función de su interacción con los materiales, puede afectar su integridad estructural, resistencia mecánica y otras propiedades fundamentales. Comprender estos efectos es esencial para garantizar la seguridad y eficiencia en el transporte y almacenamiento de este gas.

Por último, el estudio se propone establecer de manera precisa los materiales más apropiados para llevar a cabo el transporte y almacenamiento del hidrógeno de manera segura y eficiente. Este objetivo implica una evaluación de las características intrínsecas de los materiales, considerando factores como la durabilidad, resistencia a la corrosión, y capacidad de almacenamiento, entre otros.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. Doctor en Corrosión.

Abstract

Title: State of the art of materials used for the transport and storage of hydrogen *

Author(s): 2172801- Vianny Mildred Peña Niño, 2183304- Juan Sebastián Prada

Oróstegui**

Key Words: Hydrogen, transport, storage, materials, properties.

Description: The research entitled "State of the art of materials used for hydrogen transport and storage" aims to study the materials used in the different phases of the hydrogen transport and storage process. The general objective of this study is to carry out an analysis through a literature review to understand and evaluate the advances, challenges and recent developments in this crucial field for hydrogen technology.

Among the specific objectives that will guide this research is firstly the identification of the materials currently used in hydrogen transport and storage. This involves addressing both conventional materials and those state-of-the-art materials that have emerged as a result of ongoing research and development in this area.

In addition, a detailed analysis of the effects of hydrogen on the physicochemical properties of the materials used will be carried out. This aspect is of great importance, since hydrogen, depending on its interaction with materials, can affect their structural integrity, mechanical strength and other fundamental properties. Understanding these effects is essential to ensure the safe and efficient transport and storage of this gas.

Finally, the study aims to establish precisely the most appropriate materials for safe and efficient hydrogen transport and storage. This objective implies an evaluation of the intrinsic characteristics of the materials, considering factors such as durability, corrosion resistance, and storage capacity, among others.

* Degree work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. Doctor in Corrosion.

Introducción

1.1. Contexto y Justificación.

El Hidrógeno constituye aproximadamente el 75% de la materia existente en el universo, pero se encuentra de distintas maneras (Mezclado con Oxígeno para formar moléculas de Agua, con el Carbono para formar compuestos orgánicos), pero, al no ser un combustible que se encuentre en el ambiente de forma directa, se convierte en un “Vector Energético” por lo que prácticamente hay que fabricarse y puede obtenerse a partir de diversas fuentes renovables, como la energía solar, eólica, hidráulica o biomasa. (*¿Qué es el Hidrógeno y cuáles son sus aplicaciones? - Fenoge. (s. f.)*)

Una de las aplicaciones más importantes del hidrógeno es su uso como almacenamiento de energía, éste es un punto clave para su introducción en el mercado; de ahí que en el último tiempo para acá se ha aplicado en la industria el término de que el Hidrógeno tiene un “vector energético” por lo que, con este, ya se han llegado a reemplazar la gasolina con el Hidrógeno, y esto implicaría que se lleve a su respectivo Transporte y Almacenamiento.

De acuerdo con lo mencionado, es importante el estudio de los materiales utilizados para el transporte y almacenamiento del hidrógeno; por lo que, ha surgido el Plan Energético Nacional 2020-2050 de Colombia el cual establece que el hidrógeno puede tener un papel importante en la descarbonización del sector energético, especialmente en el transporte y la industria, reconociendo el potencial del hidrógeno como una fuente de energía sostenible.

1.2. Objetivos de la Tesis.

1.2.1. *Objetivo general.*

Analizar mediante revisión bibliográfica los materiales utilizados para el transporte y almacenamiento de Hidrógeno.

1.2.2. *Objetivos específicos.*

Identificar los materiales utilizados para el transporte y almacenamiento de hidrógeno.

Examinar los efectos que tiene el hidrógeno en las propiedades fisicoquímicas de los materiales que lo transportan y almacenan.

Establecer los materiales apropiados para el transporte y almacenamiento de hidrógeno.

1.3. Metodología.

1.3.1. Identificación del tema.

En esta primera etapa se realizan las lecturas de documentos con fundamentos teóricos útiles para comprender y establecer un conocimiento sobre del tema que se va a desarrollar en la revisión bibliográfica.

1.3.2. Exploración y revisión de documentos.

En esta etapa a partir de exploración en la biblioteca virtual de la Universidad, se identifican las bases de datos disponibles y oportunas para establecer las variables y la trascendencia del tema a través del tiempo, esto con el fin de recolectar información. Dentro de los documentos a seleccionar se incluirán artículos científicos, revisiones globales bibliográficas y tesis de pregrado y posgrado.

1.3.3. Selección y filtración de la información.

En esta etapa, se seleccionan artículos útiles para el desarrollo de la tesis y documentos con información empírica, útiles para comprender temas complementarios; seguidamente, se filtran y clasifican por prioridad, según cuáles proporcionan mejor información para el cumplimiento de los objetivos, como por ejemplo el uso de la herramienta Scopus el cual es muy importante para el estado del arte del desarrollo del proyecto.

1.3.4. Análisis bibliométrico.

En esta etapa por medio de la herramienta Scopus, la información se clasificará según año de publicación, países que han publicado sobre el tema a nivel internacional y si es el caso, local.

1.3.5. Análisis de la información.

En esta etapa se analizan los artículos seleccionados, filtrados, novedosos y acordes al enriquecimiento de la investigación, así mismo se toma en cuenta la información necesaria para el cumplimiento de los objetivos.

1.3.6. Identificación de avances y desafíos.

En esta etapa se reconocen los avances científicos y tecnológicos relacionados con los materiales utilizados para el transporte y almacenamiento de Hidrógeno; así mismo, se estudian los posibles desafíos que servirán para futuras investigaciones.

1.3.7. Socialización de resultados e informe final.

La socialización es una etapa que sucede durante todo el proceso y consta de reuniones periódicas entre el estudiante y el director, donde se evalúa el progreso del proyecto. Esta da el aval para la realización del informe final.

2. Fundamentos del Hidrógeno como fuente de energía.

2.1. Propiedades del Hidrógeno.

El hidrógeno, como elemento preeminente en el universo, desempeña un papel trascendental en la búsqueda de fuentes de energía que sean eco compatibles y sostenibles. Para una comprensión adecuada de su idoneidad y aplicabilidad en los contextos de transporte y almacenamiento, resulta de imperante relevancia abordar sus características físicas y químicas fundamentales.

2.1.1 Características Fisicoquímicas.

El hidrógeno ostenta una masa atómica aproximada de 1.008 u (unidades de masa atómica), ocupando un lugar como el elemento de menor masa en la tabla periódica, en condiciones de temperatura ambiente y presión estándar (25°C y 1 atm), el hidrógeno se revela como un gas incoloro, inodoro e insípido. *(Rodríguez, H. (2022, 16 septiembre)).*

Este material registra que el hidrógeno entra en ebullición a una temperatura extremadamente baja de -252.87°C y, además, se solidifica a -259.16°C, lo que implica que su presencia en estado gaseoso prevalece en las condiciones atmosféricas terrestres predominantes. *(Álvarez, D. O. (2021)).* También resulta crucial destacar que el hidrógeno gaseoso exhibe una densidad notoriamente inferior a la del aire, propensión que lo predispone a ascender en la atmósfera.

Como principales características fisicoquímicas, el hidrógeno, por virtud de su configuración electrónica que consta de un único electrón en su capa externa, presenta una elevada reactividad química, promoviendo la formación de enlaces con una diversidad de elementos que abarcan tanto metales como no metales, así como con otros átomos de hidrógeno, configurando compuestos químicos diversos. El hidrógeno se erige como altamente inflamable y, en presencia de oxígeno, suscita una reacción de combustión que emana una cantidad de energía en forma de calor y luz, sin generar residuos perjudiciales para el entorno.

El hidrógeno posee la facultad de establecer enlaces intermoleculares, entre los que destaca el enlace de hidrógeno, fenómeno químico de considerable relevancia en la conformación y propiedades de diversas moléculas tanto en el ámbito biológico como químico. En su forma molecular diatómica (H_2), el hidrógeno adquiere la configuración de una molécula compuesta por dos átomos de hidrógeno. Esta configuración representa la manifestación más común del hidrógeno en la naturaleza y se muestra esencial en múltiples aplicaciones concernientes a su almacenamiento y transporte.

2.2. Importancia del hidrógeno en la transición energética.

La transición hacia fuentes energéticas más limpias y sostenibles ha adquirido una preeminencia innegable en el escenario global, motivada por el imperativo medioambiental y la necesidad imperante de disminuir la dependencia de los hidrocarburos fósiles. Dentro de este contexto, el hidrógeno surge como un recurso de singular relevancia, ostentando un potencial sustancial para catalizar la transición energética hacia un horizonte más sustentable. Esta sección aborda, desde una perspectiva académica, la trascendental importancia del hidrógeno en la transición energética y examina detenidamente su papel fundamental en la atenuación de los desafíos energéticos y medioambientales contemporáneos. ((S/f). Gob.ec.)

2.2.1 Reducción de Emisiones de Carbono.

El hidrógeno, al ser una fuente de energía inherentemente amigable con el medio ambiente, merece especial atención desde una perspectiva académica. Ya sea utilizado a través de la combustión o como agente en celdas de combustible, su aplicación conlleva la generación de energía sin emitir directamente dióxido de carbono (CO_2). Esta característica es significativamente diferente de los combustibles fósiles, que liberan cantidades sustanciales de CO_2 y otros contaminantes al quemarse. La integración del hidrógeno en sectores clave como el transporte y la industria puede desempeñar un papel crucial en la reducción de las emisiones de carbono, un imperativo fundamental en la lucha contra el cambio climático. ((S/f-b). *Fundacionrenovables.org*).

2.2.2 Almacenamiento y Distribución de Energía Intermitente.

El desafío intrínseco a la generación de energía a partir de fuentes renovables, caracterizada por su intermitencia y dependencia de condiciones climáticas específicas, demanda soluciones ingeniosas. En este contexto, el hidrógeno se alza como un recurso de

valor, puesto que actúa como un vehículo eficaz para el almacenamiento y la distribución de energía. La energía eléctrica excedente puede canalizarse para llevar a cabo la electrólisis del agua, produciendo hidrógeno, el cual es sometido a un proceso de almacenamiento para su posterior utilización. Este proceso, conocido como "almacenamiento de energía basado en hidrógeno", (Aguado Molina, R., Casteleiro Roca, J.L., Jove Pérez, E., Zayas Gato, F., Quintián Pardo, H., Calvo Rolle, J.L. (2021)). conlleva el potencial de otorgar estabilidad y flexibilidad al suministro energético, facilitando una integración más profunda de las fuentes renovables en la red eléctrica. (Gonzalez García-Conde, Andrés. (2010)).

2.2.3 Diversificación Energética.

La reducción de la dependencia de los hidrocarburos fósiles reviste una importancia cardinal en términos de mejora de la seguridad energética, al tiempo que reduce la vulnerabilidad ante las fluctuaciones de los precios en el mercado del petróleo y del gas. El hidrógeno, como recurso energético versátil, puede ser generado a partir de diversas fuentes, entre ellas el gas natural, la biomasa y las energías solar y eólica. Esta diversificación de las fuentes de hidrógeno contribuye a la estabilidad del suministro energético y reduce la susceptibilidad ante riesgos geopolíticos inherentes a la dependencia de un único recurso energético. ((S/f-b). *Fundacionrenovables.org*).

2.2.4 Estímulo a la Innovación Tecnológica.

La inversión y el desarrollo en tecnologías relacionadas con el hidrógeno ejercen una influencia catalizadora en la innovación, abarcando ámbitos que comprenden desde la producción de energía hasta el almacenamiento, la distribución y la movilidad. Este fenómeno no solo aporta beneficios sustanciales a la transición energética, sino que también dinamiza la economía, fomenta la creación de empleos y promueve la competitividad global en el campo tecnológico.

En síntesis, el hidrógeno se posiciona como un elemento de capital importancia en la transición hacia un sistema energético de mayor sustentabilidad. En los segmentos sucesivos de esta investigación, se abordarán con mayor profundidad los aspectos operativos y tecnológicos vinculados al empleo del hidrógeno en los contextos de transporte y almacenamiento. (González García-Conde, Andrés. (2010)).

2.3. Aplicaciones del hidrógeno.

El hidrógeno, caracterizado por su singularidad como recurso energético limpio y versátil, ostenta un papel fundamental en una diversidad de aplicaciones estratégicas que contribuyen a la materialización de una transición energética más sostenible. Esta sección se dedica a la exploración de las diversas aplicaciones del hidrógeno en varios sectores, además de analizar exhaustivamente su función esencial en la transformación de sistemas energéticos tradicionales hacia alternativas respetuosas con el medio ambiente. (*Hidrógeno - Centro Nacional de Hidrógeno. (2019, febrero 6).*)

Una de las aplicaciones preeminentes del hidrógeno es su uso como agente energético en vehículos propulsados por celdas de combustible. Estos vehículos, impulsados por la reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno en una celda de combustible, generan electricidad que alimenta motores eléctricos. Esta tecnología presenta ventajas notables, como la ausencia de emisiones de escape, mayor eficiencia en comparación con los motores de combustión interna y tiempos de recarga más breves en contraposición con las baterías eléctricas. La movilidad basada en el hidrógeno se configura como una solución prometedora para reducir la dependencia de los hidrocarburos fósiles en el ámbito del transporte.

El hidrógeno asume un papel crucial en el almacenamiento de energía, particularmente en la incorporación de fuentes de energía renovable intermitente, como la solar y la eólica. El excedente de energía de estas fuentes se puede destinar a la electrólisis del agua, lo que genera hidrógeno que se almacena y posteriormente se transforma en electricidad cuando se requiere. Esta capacidad de almacenamiento, a gran escala y a largo plazo, emerge como un elemento esencial para la estabilidad de la red eléctrica y la facilitación de la transición hacia un sistema energético más limpio y confiable.

La industria ha abrazado el hidrógeno como una alternativa sostenible en diversos procesos químicos y de manufactura. Entre estos, destacan la producción de amoníaco, fundamental en la fabricación de fertilizantes agrícolas, así como su uso en la refinación del petróleo y la producción de acero, donde puede sustituir a los combustibles fósiles, reduciendo con ello las emisiones de carbono asociadas a dichas actividades industriales.

En el contexto de la distribución de energía, el hidrógeno puede ocupar un lugar relevante como portador de energía. Su capacidad para ser transportado a largas distancias y su eficiente capacidad de almacenamiento lo convierten en una opción viable para suministrar energía en áreas alejadas o para su exportación. La infraestructura relacionada con el transporte

y la distribución de hidrógeno está experimentando un continuo proceso de desarrollo y expansión.

3. Identificación de Materiales para el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.

El elemento Hidrógeno es el elemento que más se encuentra abundantemente en todo el universo; ciertas propiedades tales como su masa molar (2.016 g/mol), su punto de fusión (14K) y su punto de ebullición a presión atmosférica (20K) hacen que este elemento sea prácticamente imposible de convertir en líquido para su almacenamiento a grandes escalas.

Otro aspecto por tener es que dado a que la densidad energética volumétrica del hidrógeno (10.050 kJ/m³) es mucho menor que de otros gases como lo son la gasolina (31.150 kJ/m³) o el metano (32.560 kJ/m³) se considera que el hidrógeno es un vector energético y no como una fuente de energía, pero su potencial de energía lo hace un gas capacitado para reemplazar un valor aproximado al 60% de la utilización total del gas natural requerido mayoritariamente en aplicaciones no industriales. (*Bon Navaid, Humza; Emadi, Hossein; Watson, Marshall. (2022).*)

Tabla 1.

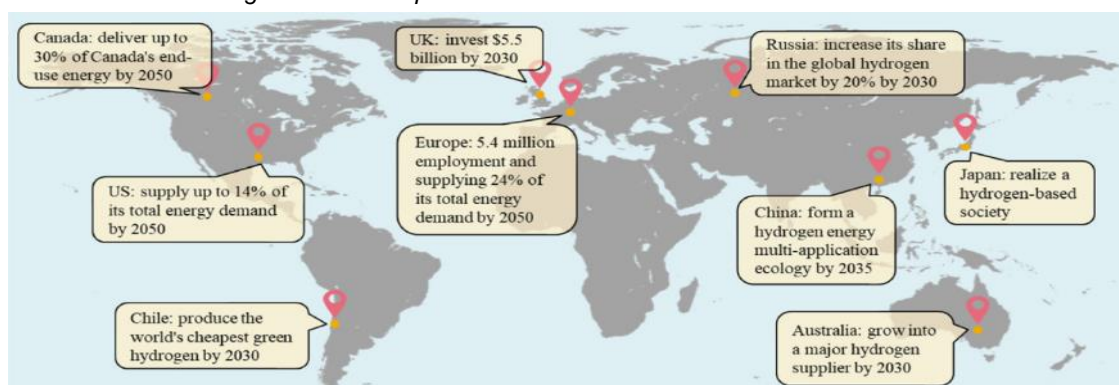
Densidad Energética de distintos combustibles

Combustible	Densidad Energética (kJ/m ³)
Hidrógeno	10.050
Gasolina	31.560
Metano	32.560

Nota. (Comparación del Hidrógeno con distintos combustibles como la gasolina y el metano). Tomado de A comprehensive literature review on the challenges associated with underground hydrogen storage. (2022)

Figura 1

Política de Hidrógeno en ciertos países



Nota. Tomado de A review of hydrogen-air cloud explosions: The fundamentals, overpressure prediction methods, and influencing factors.

Ya que el Hidrógeno se está convirtiendo en un combustible importante y muy desarrollado a partir del momento de buscar distintas maneras de reutilizar la energía ciertos países se han encargado de implementar ciertas políticas no solo para el desarrollo sino para su sostenimiento y posterior desarrollo sobre este. (Hu, Qingchun; Zhang, Xihong; Hao, Hang. (2023))

El eficiente y seguro almacenamiento y transporte de hidrógeno son aspectos cruciales en la utilización sostenible de esta invaluable fuente energética. La identificación y evaluación de materiales aptos para estas funciones se erige como un imperativo en la investigación vinculada a la tecnología del hidrógeno. En el presente capítulo, se emprende un análisis profundo de las diferentes categorías de materiales empleados en el transporte y almacenamiento de hidrógeno, abordando sus propiedades intrínsecas, ventajas y desafíos inherentes.

3.1. Utilización de Metales en el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.

El empleo de metales en el ámbito del transporte y almacenamiento de hidrógeno es esencial debido a sus propiedades singulares de absorción y adsorción de este gas. Este capítulo tiene como propósito el análisis detallado de los metales empleados en estas aplicaciones, así como la exposición pormenorizada de sus características, ventajas y retos inherentes.

Los metales poseen propiedades notables que los hacen idóneos para la función de almacenamiento de hidrógeno. Su capacidad para establecer enlaces químicos con el hidrógeno y absorberlo en su estructura cristalina posibilita la consecución de una elevada densidad de almacenamiento. Entre los metales destacados para este propósito, figuran:

- El paladio se caracteriza por su habilidad para absorber cantidades considerables de hidrógeno, formando hidruros metálicos estables. Esta propiedad lo posiciona como uno de los metales más promisorios en el contexto del almacenamiento de hidrógeno.
- El platino, igualmente, tiene la capacidad de constituir hidruros metálicos y ha sido objeto de investigación en aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno.

- Ciertos metales de tierras raras y sus aleaciones, como el lantano, el cerio y el neodimio, han evidenciado una capacidad destacable para adsorber hidrógeno en aplicaciones de almacenamiento.
- Las aleaciones metálicas, conformadas por la combinación de dos o más metales, han demostrado un alto potencial en el contexto del almacenamiento de hidrógeno.
- Las aleaciones de Titanio-Níquel pueden ser ajustadas para optimizar la capacidad de almacenamiento y la cinética de absorción y desorción de hidrógeno, adecuándose así a aplicaciones específicas.
- Las aleaciones de magnesio y titanio también han revelado ser prometedoras para el almacenamiento de hidrógeno debido a su capacidad de adsorción.

La modificación de la superficie de los metales resulta esencial para elevar su capacidad de almacenamiento de hidrógeno. Estrategias como la aplicación de recubrimientos y la incorporación de nanomateriales pueden incrementar la eficiencia de adsorción y desorción, así como fortalecer la estabilidad de los materiales en condiciones de almacenamiento.

No obstante, sus ventajas, la utilización de metales en el almacenamiento de hidrógeno plantea desafíos significativos. Estos incluyen la necesidad de operar a altas presiones y temperaturas para la absorción y desorción, la susceptibilidad de algunos metales a la fragilización en temperaturas extremadamente bajas, y la importancia de identificar materiales asequibles y sostenibles para aplicaciones a gran escala.

3.2 Compuestos Orgánicos.

Los compuestos orgánicos, en especial los hidruros metálicos, captaron la atención debido a su densidad de almacenamiento de hidrógeno (*González Alberdi, C. (2020)*). Hidruros metálicos como el alanato de sodio (NaAlH_4) y el borohidruro de sodio (NaBH_4) ejemplifican compuestos capaces de liberar hidrógeno en reacciones reversibles, constituyendo opciones atractivas para el almacenamiento. No obstante, la liberación de hidrógeno requiere con frecuencia condiciones específicas de temperatura y presión, lo que limita la eficacia y aplicabilidad de estos sistemas en entornos de almacenamiento a gran escala.

3.3. Aleaciones de Aluminio en el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.

Las aleaciones de aluminio han emergido como materiales de gran relevancia en el contexto del transporte y almacenamiento de hidrógeno. (*Páez, C. E. C. (s/f)*). Este capítulo se

dedica a examinar en detalle las aleaciones de aluminio utilizadas en estas aplicaciones, incluyendo sus características, ventajas, y los desafíos inherentes asociados a su implementación.

Las aleaciones de aluminio se caracterizan por ser ligeras, lo que las convierte en opciones atractivas para aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y sistemas de movilidad. Su baja densidad, combinada con la capacidad de modificarse para optimizar propiedades específicas, les otorga una versatilidad única en este contexto. Algunas de las aleaciones de aluminio más notables en esta categoría son:

- **Aleación Aluminio-Litio:** Esta aleación combina aluminio con litio, lo que resulta en una reducción significativa de peso y una mejora en la densidad de energía. Estas propiedades la hacen especialmente adecuada para aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno en la industria aeroespacial.
- **Aleación Aluminio-Magnesio:** La inclusión de magnesio en la aleación de aluminio-magnesio proporciona una mayor resistencia y durabilidad, lo que la hace valiosa en aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno en vehículos terrestres.
- **Aleaciones de Aluminio de Alta Resistencia:** En el contexto del almacenamiento de hidrógeno, las aleaciones de aluminio de alta resistencia son de particular interés. Estas aleaciones pueden soportar presiones sustanciales y mantienen una integridad estructural adecuada durante la absorción y desorción de hidrógeno. Las aleaciones de aluminio-litio y aluminio-magnesio son ejemplos notables en esta categoría.

Las aleaciones de aluminio pueden absorber hidrógeno en su estructura cristalina, formando hidruros metálicos. Este proceso se lleva a cabo en condiciones de presión y temperatura específicas. La capacidad de absorción y desorción de hidrógeno varía según la composición de la aleación, y es un aspecto clave que se explora en esta sección.

3.4 Materiales Nanoestructurados: Mejora de Superficies y Cinética.

Los materiales nanoestructurados han surgido como una disciplina en crecimiento para el almacenamiento de hidrógeno. Los nanotubos de carbono (CNTs), por ejemplo, presentan una estructura porosa y un área superficial ampliada, permitiéndoles absorber hidrógeno en su matriz. ((s/f). *Gob.mx*).

Adicionalmente, los Metal-organic Frameworks (MOFs) han ganado interés por su capacidad de adsorción elevada (*Hu, Qingchun; Zhang, Xihong; Hao, Hang. (2023)*). Estos

frameworks son estructuras porosas con orden cristalino que pueden ser adaptadas para optimizar la cinética de absorción y desorción de hidrógeno.

3.5. Polímeros en el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.

A continuación, explicaremos la aplicación de polímeros en el transporte y almacenamiento de hidrógeno, centrándonos en tres polímeros específicos: el polietileno, el polipropileno y el poliéster. (*Coloma de Andrés, M. (2021)*). Estos polímeros desempeñan un papel esencial en estas aplicaciones debido a sus características únicas y su versatilidad.

- **Polietileno en el Almacenamiento de Hidrógeno:** El polietileno, un polímero ampliamente utilizado, ha demostrado su utilidad en el almacenamiento de hidrógeno. Se ha investigado su capacidad para encapsular hidrógeno en forma de nanoburbujas o nanoestructuras, lo que permite una mayor densidad de almacenamiento. El polietileno modificado puede ajustarse para optimizar la absorción y desorción de hidrógeno, lo que lo convierte en un material prometedor en esta área.
- **Polipropileno y su Papel en el Almacenamiento de Hidrógeno:** El polipropileno, otro polímero común, también ha sido objeto de estudio en el contexto del almacenamiento de hidrógeno. Su versatilidad y durabilidad hacen que sea una opción atractiva para contenedores y sistemas de almacenamiento. Investigaciones recientes se centran en la modificación de polipropileno para mejorar su capacidad de adsorción y desorción de hidrógeno, lo que amplía sus posibilidades de aplicación.
- **Poliéster y su Contribución al Almacenamiento de Hidrógeno:** El poliéster es otro polímero relevante en el transporte y almacenamiento de hidrógeno. Se ha investigado su uso en el desarrollo de materiales de almacenamiento ligeros y resistentes. Los poliésteres modificados muestran una mayor afinidad por el hidrógeno, lo que mejora su capacidad de absorción y desorción. Estos avances respaldan su aplicación en sistemas de almacenamiento de hidrógeno eficientes y seguros.
- **Polímeros Emergentes y Perspectivas Futuras:** Además de los polímeros mencionados, la investigación continúa explorando polímeros emergentes con propiedades únicas para el almacenamiento y transporte de hidrógeno. Estos polímeros pueden ofrecer ventajas adicionales en términos de eficiencia, seguridad

y sostenibilidad. El desarrollo y la evaluación de estos nuevos materiales son esenciales para avanzar en esta área.

3.6. Utilización de CFRP en el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.

Se explora la aplicación de materiales compuestos conocidos como CFRP (Fibra de Carbono Reforzado con Polímero) en el contexto del transporte y almacenamiento de hidrógeno. (*Kyotani T. In: Yasuda E, Inagaki M, Kaneko K, Endo M, Oya A, Tanabe Y, editors. Carbon alloys. (2003)*). Estos materiales combinan fibras de carbono con matrices poliméricas, lo que les confiere propiedades excepcionales y versatilidad en estas aplicaciones específicas.

El CFRP está compuesto por fibras de carbono impregnadas con una matriz polimérica, generalmente resina epoxi o resina de poliéster. Las fibras de carbono proporcionan alta resistencia y rigidez, mientras que el polímero contribuye a su ligereza y maleabilidad. Esta combinación lo convierte en un material de interés para aplicaciones de almacenamiento y transporte de hidrógeno.

El CFRP exhibe propiedades excepcionales que lo hacen adecuado para el almacenamiento de hidrógeno. Su alta resistencia a la corrosión, bajo peso y capacidad de modificación lo convierten en un material prometedor. Se ha investigado su potencial en la fabricación de contenedores de almacenamiento de hidrógeno y tanques de alta presión, lo que ofrece una alternativa a los materiales metálicos tradicionales.

El CFRP puede ser diseñado para facilitar la absorción y desorción de hidrógeno. La estructura de fibras de carbono permite la formación de enlaces químicos con el hidrógeno, lo que favorece su retención. Las investigaciones actuales se centran en la optimización de esta capacidad para mejorar la eficiencia del almacenamiento de hidrógeno.

La modificación de la superficie del CFRP es esencial para mejorar su capacidad de almacenamiento de hidrógeno. Estrategias como la aplicación de recubrimientos específicos y la incorporación de nanomateriales pueden aumentar la eficiencia de adsorción y desorción, así como la resistencia química en entornos de almacenamiento de hidrógeno.

3.7. Utilización de Materiales Híbridos en el Contexto del Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.

A continuación, se investigará sobre la aplicación de materiales híbridos en el transporte y almacenamiento de hidrógeno. Los materiales híbridos, que resultan de la combinación de al

menos dos tipos de componentes con propiedades complementarias, ofrecen nuevas oportunidades y ventajas en estas aplicaciones específicas. ((s/f). *Imcyc.com*).

Los materiales híbridos se caracterizan por estar compuestos por al menos dos tipos de componentes, que pueden incluir polímeros, metales, nanomateriales y otros elementos. Esta combinación de materiales permite la creación de propiedades únicas, como una capacidad mejorada de almacenamiento de hidrógeno y una eficiencia superior en la adsorción y desorción.

Los materiales híbridos han sido objeto de una amplia investigación para su implementación en el almacenamiento de hidrógeno. La combinación de diferentes componentes puede mejorar la retención de hidrógeno, lo que resulta en una mayor densidad de almacenamiento. Ejemplos de materiales híbridos incluyen nanopartículas metálicas encapsuladas en matrices poliméricas o compuestos basados en carbono, que han demostrado ser altamente efectivos en la absorción y desorción de hidrógeno.

La modificación de la superficie y la optimización de la composición de los materiales híbridos son estrategias cruciales para mejorar su capacidad de almacenamiento de hidrógeno. Esto puede lograrse mediante la aplicación de recubrimientos específicos o la incorporación de nanomateriales en la estructura híbrida.

4. Tipos de almacenamiento de Hidrógeno.

En este capítulo, se explorarán los diversos métodos de almacenamiento de hidrógeno disponibles, destacando las categorías principales, como el almacenamiento en forma gaseosa, líquida, y sólida. Además, se abordarán las subcategorías, incluyendo el almacenamiento orgánico y metálico, que representan avances significativos en la capacidad de almacenamiento y la eficiencia energética. *Páez, C. E. C. (s/f)*.

4.1. Almacenamiento de Hidrógeno en Forma Gaseosa: Consideraciones y Perspectivas.

El método de almacenamiento de hidrógeno en forma gaseosa representa una de las técnicas más prevalentes y consolidadas en el panorama de la industria del hidrógeno. Este procedimiento implica la compresión del hidrógeno a presiones elevadas o su enfriamiento a temperaturas criogénicas con el fin de mantenerlo en un estado gaseoso. (*Páez, C. E. C. (s/f)*). En este apartado, se examinan con profundidad los elementos esenciales de este enfoque de almacenamiento:

Los recipientes de almacenamiento de hidrógeno gaseoso son meticulosamente concebidos para resistir presiones sustanciales. Comúnmente, estos depósitos son

confeccionados con materiales como el acero fortalecido o aleaciones de aluminio que pueden soportar las presiones requeridas para mantener el hidrógeno en una forma gaseosa comprimida. La selección del material y el diseño dependen directamente de la presión operativa específica y las aplicaciones particulares.

Los contenedores destinados al almacenamiento de hidrógeno en su forma gaseosa pueden funcionar a diversas presiones, oscilando desde aproximadamente 350 bares hasta valores de 700 bares o incluso superiores, dependiendo de las regulaciones vigentes y las necesidades inherentes a la aplicación. Esta elevada presión posibilita una densidad de almacenamiento superior, redundando en una mayor autonomía de los vehículos propulsados por celdas de combustible de hidrógeno y una eficacia superior en el almacenamiento y la distribución de hidrógeno comprimido.

Este método de almacenamiento encuentra aplicaciones primordiales en el ámbito de la movilidad, especialmente en vehículos de celdas de combustible, en los cuales el almacenamiento a alta presión se erige como un pilar fundamental para proporcionar la energía requerida. Además, los contenedores de almacenamiento de hidrógeno gaseoso también se despliegan en sistemas de almacenamiento de energía estacionaria, en los cuales el hidrógeno comprimido puede ser liberado según las necesidades para la generación de electricidad.

4.2 Almacenamiento de Hidrógeno en Forma Líquida: Optimización de la Densidad Energética.

El almacenamiento de hidrógeno en estado líquido es un método esencial en la gestión del hidrógeno, caracterizado por el enfriamiento del hidrógeno a temperaturas extremadamente bajas para que pase al estado líquido (*Pérez, C. E. C. (s/f)*), lo que resulta en una mayor densidad de almacenamiento. A continuación, profundizaremos en los aspectos fundamentales de este enfoque:

Los recipientes de almacenamiento de hidrógeno en estado líquido son objeto de un diseño meticuloso con el propósito de mantener el hidrógeno en su forma líquida a temperaturas criogénicas extremadamente frías. Estos tanques se fabrican con materiales altamente especializados, como el acero inoxidable y compuestos avanzados, que son capaces de preservar la integridad del tanque incluso a temperaturas que pueden descender por debajo de -250 grados Celsius. Además, se aplican técnicas de aislamiento térmico avanzadas para minimizar la pérdida de temperatura.

La característica definitoria de estos tanques es su capacidad para mantener el hidrógeno en forma líquida a temperaturas extremadamente bajas. El hidrógeno líquido ofrece

una densidad de almacenamiento significativamente superior en comparación con el hidrógeno gaseoso comprimido, lo que lo convierte en una opción particularmente atractiva para aplicaciones que requieren una alta densidad energética.

Los tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido encuentran aplicaciones en una amplia variedad de sectores. Son esenciales en la propulsión de cohetes y naves espaciales, donde se demanda una densidad de energía excepcionalmente elevada. Además, se emplean en la refrigeración criogénica de superconductores, una necesidad fundamental en la investigación y la industria, así como en la producción de hidrógeno para aplicaciones químicas y de laboratorio.

La seguridad es una consideración crítica en el uso de los tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido debido a las temperaturas criogénicas potencialmente peligrosas. Los desafíos comprenden la gestión segura de temperaturas extremadamente bajas, la prevención de fugas y el aseguramiento de la integridad estructural a lo largo del tiempo.

4.3 Almacenamiento de Hidrógeno en Sólidos: Innovación en la Captura Molecular.

La técnica de almacenamiento de hidrógeno en sólidos representa un enfoque innovador que se basa en el uso de materiales sólidos, como los hidruros metálicos y otros compuestos, para la captura y liberación controlada de hidrógeno. Esta modalidad de almacenamiento es fundamental en la búsqueda de alternativas más seguras y eficientes. A continuación, se analizan los aspectos esenciales de este enfoque

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno en sólidos se distinguen por su construcción con materiales compuestos por hidruros metálicos y otros componentes específicos que tienen la capacidad de absorber y liberar hidrógeno de manera reversible. Estos materiales sólidos pueden ser seleccionados y diseñados de forma precisa para retener hidrógeno a presiones y temperaturas adecuadas según la aplicación particular.

Una de las ventajas fundamentales de esta tecnología radica en su capacidad para capturar y liberar hidrógeno de manera segura en estado sólido, eliminando los riesgos asociados con el almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido o líquido criogénico. Además, los tanques de hidrógeno en sólidos pueden ofrecer una densidad de almacenamiento similar o incluso superior a otros métodos de almacenamiento, lo que es crucial para aplicaciones de alta densidad de energía.

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno en sólidos tienen aplicaciones en diversos sectores, incluyendo la movilidad, la generación de energía y el almacenamiento estacionario. Su potencial para proporcionar una solución segura y versátil en la transición

hacia una economía basada en el hidrógeno está siendo objeto de una creciente investigación y desarrollo.

4.4 Almacenamiento de Hidrógeno en Nanomateriales: Avances en la Capacidad de Almacenamiento a Escala Nanométrica.

En esta sección, exploramos la importancia del almacenamiento de hidrógeno en nanomateriales, una innovación que aprovecha las propiedades excepcionales de los materiales a escala nanométrica para lograr una retención segura y eficaz de hidrógeno. *Páez, C. E. C. (s/f)*. Esta tecnología representa un avance significativo en la capacidad de almacenamiento a nivel nanométrico. A continuación, analizamos los aspectos esenciales de este enfoque

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno en nanomateriales se caracterizan por su concepción basada en materiales a escala nanométrica, como nanotubos de carbono, nanopartículas metálicas y otros componentes a esta escala. Estos materiales poseen una alta relación entre su superficie y su volumen, así como propiedades de adsorción únicas que permiten la captura y liberación controlada de hidrógeno a nivel nanométrico.

Uno de los aspectos sobresalientes de esta tecnología radica en su capacidad para retener cantidades considerables de hidrógeno en un espacio extremadamente reducido, a una escala nanométrica. Los nanomateriales proporcionan una superficie de adsorción extensa y permiten la retención de hidrógeno a presiones moderadas y temperaturas ambientales, lo que simplifica considerablemente la infraestructura de almacenamiento y distribución.

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno en nanomateriales presentan aplicaciones potenciales en una amplia variedad de sectores, desde la movilidad hasta la generación de energía y la electrónica a nivel nanométrico. Su capacidad para retener hidrógeno de manera eficiente y segura en dimensiones nanométricas ha suscitado un gran interés en la búsqueda de soluciones avanzadas y sostenibles de almacenamiento.

4.5 Almacenamiento de Hidrógeno en Líquidos Orgánicos: Innovación en el Transporte y Almacenamiento Eficiente.

En este segmento, examinamos la importancia del almacenamiento de hidrógeno utilizando líquidos orgánicos, una novedosa tecnología que aprovecha las características únicas de compuestos orgánicos para garantizar un almacenamiento seguro y efectivo del hidrógeno en estado líquido. (*M. Gisela Orcajo, Juan A. Botas, Guillermo Calleja, Manuel Sánchez-Sánchez, 2011*). Este enfoque representa un avance sustancial en la capacidad de transportar y

almacenar hidrógeno. A continuación, analizamos en detalle los elementos esenciales de esta tecnología:

El método de almacenamiento de hidrógeno en líquidos orgánicos se caracteriza por su diseño fundamentado en compuestos orgánicos, tales como líquidos iónicos y amidas, y otros líquidos basados en carbono. Estos compuestos orgánicos poseen la capacidad de absorber hidrógeno de forma reversible y ofrecen ventajas considerables en términos de densidad de almacenamiento y facilidad de manejo.

Una de las ventajas fundamentales de esta tecnología reside en su habilidad para almacenar hidrógeno en estado líquido a temperaturas y presiones moderadas, simplificando en gran medida los requerimientos de almacenamiento y transporte en comparación con el hidrógeno gaseoso o el hidrógeno líquido criogénico. Adicionalmente, los líquidos orgánicos pueden proporcionar una alta densidad de almacenamiento y mejorar la seguridad.

Los líquidos orgánicos para el almacenamiento de hidrógeno poseen aplicaciones potenciales en diversos sectores, que incluyen movilidad, generación de energía y procesos químicos industriales. Su capacidad para almacenar hidrógeno de manera eficiente y segura en estado líquido ha generado un considerable interés en la búsqueda de soluciones avanzadas y sostenibles para el almacenamiento.

4.6 Almacenamiento de Hidrógeno en Forma de Portadores Químicos: Investigación de Soluciones para el Transporte y Almacenamiento.

En esta sección, se explora la idea de almacenar hidrógeno utilizando portadores químicos, una estrategia que implica la absorción del hidrógeno por compuestos químicos específicos para su posterior liberación en momentos necesarios. Este enfoque representa una manera innovadora de abordar los desafíos asociados con el transporte y almacenamiento del hidrógeno. ((S/f). *Academia.edu.*) A continuación, se analizan en profundidad los aspectos fundamentales de esta metodología:

El almacenamiento de hidrógeno en forma de portadores químicos se basa en la capacidad de ciertos productos químicos para absorber y liberar hidrógeno de manera reversible. Estos productos químicos, conocidos como portadores, pueden ser diseñados específicamente para capturar y liberar hidrógeno de manera eficaz a temperaturas y presiones determinadas.

Una de las ventajas clave de esta tecnología es su capacidad para transportar hidrógeno de forma segura y eficiente en forma de portadores químicos, ya sea en estado sólido o líquido.

Esto simplifica los desafíos logísticos y de seguridad que se asocian con el hidrógeno en estado gaseoso o líquido y ofrece una mayor flexibilidad en cuanto a la distribución y utilización del hidrógeno.

Los portadores químicos para el almacenamiento de hidrógeno tienen aplicaciones potenciales en una amplia gama de sectores, incluyendo la movilidad, la generación de energía y la industria química. Su capacidad para proporcionar una solución versátil y segura para el transporte y almacenamiento de hidrógeno ha suscitado un gran interés en la búsqueda de soluciones avanzadas y sostenibles.

4.7 Evaluación de la Seguridad en el Almacenamiento de Hidrógeno: Análisis y Gestión de Riesgos.

Este capítulo se centrará en la evaluación de la seguridad en el almacenamiento de hidrógeno, un aspecto crítico para asegurar su utilización confiable y salvaguardar la integridad de las personas y el entorno ((S/f). *Academia.edu.*), también se examinarán las consideraciones relacionadas con la seguridad, los peligros inherentes y las estrategias para minimizar los riesgos asociados con el almacenamiento de hidrógeno. A continuación, se resumen los aspectos esenciales de este tema:

La seguridad en el almacenamiento de hidrógeno adquiere una importancia primordial debido a su naturaleza inflamable y su potencial para provocar explosiones. Esto implica la necesidad de considerar cómo prevenir fugas, anticipar posibles accidentes y reducir al mínimo las consecuencias adversas en caso de incidentes. Identificar los riesgos y comprender las propiedades del hidrógeno son pasos fundamentales en la evaluación de la seguridad.

Los riesgos más comunes vinculados al almacenamiento de hidrógeno abarcan fugas, incendios y explosiones. Las fugas de hidrógeno pueden ser peligrosas debido a su capacidad de propagarse rápidamente. Los incendios pueden desencadenarse cuando el hidrógeno entra en contacto con una fuente de ignición. Las explosiones pueden resultar de acumulaciones de hidrógeno inflamable en áreas confinadas. Además, las fugas de hidrógeno pueden causar la degradación de materiales y equipos.

La mitigación de riesgos en el almacenamiento de hidrógeno implica desarrollar e implementar estrategias destinadas a reducir la probabilidad de incidentes y minimizar sus consecuencias. Esto abarca la adopción de sistemas de detección de fugas, la aplicación de medidas de prevención de incendios y explosiones, y la elaboración de planes de respuesta en

caso de incidentes. También se investiga la seguridad de los materiales de almacenamiento y se diseñan protocolos de inspección y mantenimiento.

En numerosos países, existen regulaciones y normativas específicas que establecen directrices para el almacenamiento seguro de hidrógeno, con el propósito de garantizar la seguridad. Estas normativas abarcan desde la construcción y el funcionamiento seguros de tanques y sistemas de almacenamiento hasta las prácticas seguras de manipulación y transporte. Cumplir con estas normativas es esencial para asegurar un almacenamiento de hidrógeno seguro y responsable.

La investigación constante en seguridad del almacenamiento de hidrógeno busca identificar riesgos emergentes y desarrollar tecnologías y prácticas más seguras. Esto incluye la evaluación de nuevos materiales, sistemas de detección avanzados y técnicas de mitigación más efectivas. La colaboración entre la industria, la academia y las entidades reguladoras es crucial para avanzar en la seguridad del almacenamiento de hidrógeno.

4.8. Comparación de los Métodos de Almacenamiento de Hidrógeno.

En este apartado, realizaremos una comparación detallada de los diferentes métodos de almacenamiento de hidrógeno que han sido examinados en este estudio. Cada método será evaluado en términos de su eficiencia, densidad de almacenamiento, aplicabilidad en diversos sectores, seguridad y sostenibilidad, así como perspectivas futuras y avances tecnológicos. A continuación, presentamos los aspectos clave de esta comparación:

Tabla 2.

Comparación de los métodos de Almacenamiento mediante ciertos factores.

	Eficiencia	Densidad de Almacenamiento:	Aplicabilidad:	Seguridad y Sostenibilidad:
Almacenamiento Gaseoso a Alta Presión	Eficiencia razonable en la retención de hidrógeno.	Tiene una densidad de almacenamiento moderada a alta debido a la alta presión requerida.	Ampliamente utilizado en movilidad y aplicaciones industriales, aunque la presión puede ser un desafío	Requiere medidas de seguridad para trabajar con altas presiones. La sostenibilidad depende de la

	Eficiencia	Densidad de Almacenamiento:	Aplicabilidad:	Seguridad y Sostenibilidad:
			en ciertos contextos.	fuentes de hidrógeno.
Almacenamiento Líquido Criogénico	Ofrece una alta eficiencia debido a la densidad de almacenamiento superior en forma líquida.	Tiene una densidad de almacenamiento alta, especialmente en aplicaciones de larga distancia.	Ampliamente utilizado en la industria y la movilidad, pero requiere condiciones criogénicas.	Requiere gestión de temperaturas extremadamente bajas y aislamiento térmico. Sostenible con fuentes de energía limpias.
Almacenamiento en Materiales Metálicos	Ofrece una buena eficiencia y retención de hidrógeno a presión ambiente.	Tiene una densidad de almacenamiento moderada, adecuada para aplicaciones de movilidad.	Ampliamente aplicable en movilidad y almacenamiento estacionario.	Requiere medidas de seguridad y está relacionado con la elección de materiales. Puede ser sostenible con reciclaje de metales.
Almacenamiento en Nanotubos de Carbono y Nanopartículas de Metal	Ofrece alta eficiencia debido a la capacidad de retención a nivel nanométrico.	Tiene una densidad de almacenamiento muy alta en espacios reducidos.	Potencial en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la movilidad y la industria.	Requiere enfoque en estabilidad y seguridad a nivel nanométrico. Sostenible con reciclaje de materiales.

	Eficiencia	Densidad de Almacenamiento:	Aplicabilidad:	Seguridad y Sostenibilidad:
Almacenamiento en Otros Materiales (Polímeros, CFRP, Zeolitas):	Eficiencia variable según el material, con enfoque en la captura molecular.	Puede variar significativamente según el material y la aplicación.	Potencial en sectores específicos, como la química molecular o la electrónica.	Depende de las propiedades del material y la aplicación. Sostenible con enfoque en reciclaje.

Nota. Comparación de los métodos de almacenamiento, teniendo en cuenta los factores mencionados en el capítulo.

5. Efectos del Hidrógeno en las Propiedades de los Materiales para el Transporte y Almacenamiento.

En el presente capítulo, se llevará a cabo un análisis exhaustivo sobre cómo la relación entre el hidrógeno y los materiales designados para su transporte y almacenamiento impacta en sus características fisicoquímicas. Se llevará a cabo una evaluación detallada acerca de cómo la existencia de hidrógeno ejerce una influencia determinante en aspectos fundamentales, incluyendo, pero no limitado a ellos, la estructura cristalina, la resistencia mecánica, la conductividad térmica y eléctrica, así como la perdurabilidad intrínseca de dichos materiales.

5.1. Cambios Estructurales y Cristalográficos.

La indagación profunda de la interacción entre el hidrógeno y los materiales concebidos para el transporte y almacenamiento desvela un fenómeno de trascendental relevancia: la modificación sustancial de las propiedades estructurales y cristalográficas de tales materiales. Esta interacción no se restringe a la superficie, sino que implica cambios profundos en la disposición atómica y en la propia estructura de la red cristalina.

En el caso de los metales y aleaciones mencionados, como el paladio y sus aleaciones, la absorción de hidrógeno origina una serie de cambios estructurales de marcada importancia. La creación de hidruros metálicos en la matriz del material ejemplifica este proceso (*Hu, Qingchun; Zhang, Xihong; Hao, Hang. (2023)*). La introducción de átomos de hidrógeno en los intersticios de la red cristalina conlleva una expansión volumétrica de la estructura, generando una distorsión en los parámetros de red.

Las aleaciones de magnesio y titanio, asimismo abordadas anteriormente, experimentan transformaciones en su estructura cristalina en respuesta a la interacción con el hidrógeno. La génesis de hidruros y la ocupación de sitios intersticiales por átomos de hidrógeno pueden dar lugar a tensiones internas y remodelar la red cristalina. Este fenómeno es especialmente visible en las aleaciones de magnesio, donde el fenómeno de fragilización por hidrógeno desempeña un papel crucial en aplicaciones que requieren integridad estructural. ((s/f). *Imcyc.com.*)

Los materiales nanoestructurados, tales como los nanotubos de carbono y los metal-organic frameworks (MOFs), también experimentan cambios estructurales en presencia de hidrógeno. En el caso de los nanotubos de carbono, la adsorción de hidrógeno puede originar deformaciones locales en la estructura hexagonal de los nanotubos, alterando la distribución electrónica en la superficie del nanotubo y, por ende, sus propiedades de adsorción y conducción. Respecto a los MOFs, la presencia de hidrógeno puede influir en la porosidad y en la estructura cristalina de la red, repercutiendo en su capacidad de adsorción selectiva y en la robustez de la estructura porosa (*Hu, Qingchun; Zhang, Xihong; Hao, Hang. (2023)*).

5.2. Propiedades de Absorción y Desorción de Hidrógeno.

La evaluación de las propiedades vinculadas a la absorción y desorción de hidrógeno en los materiales destinados a su transporte y almacenamiento reviste un papel de capital importancia en la definición de su idoneidad y eficacia para estas aplicaciones cruciales (*Hu, Qingchun; Zhang, Xihong; Hao, Hang. (2023)*). Como ha sido explorado en profundidad en el Capítulo 2, los diversos tipos de materiales exhiben una gama heterogénea de comportamientos en lo que concierne a la absorción y desorción de hidrógeno. Este aspecto es una manifestación de las particularidades inherentes a cada material y su relación con el hidrógeno. A continuación, se procede a examinar en detalle las características centrales de absorción y desorción en algunos de los materiales que se han mencionado con anterioridad:

Los metales y sus aleaciones poseen la capacidad de absorber hidrógeno en forma de hidruros metálicos, bajo condiciones específicas de temperatura y presión. Este fenómeno de absorción y posterior desorción del hidrógeno es un proceso reversible, lo que confiere la posibilidad de almacenamiento cíclico del gas. Sin embargo, conviene resaltar que las condiciones operativas, tales como la temperatura y la presión, ejercen un impacto significativo en la capacidad y la velocidad de los procesos de absorción y desorción. Es preciso, por tanto, abordar la optimización de estas condiciones con miras a maximizar la eficiencia del sistema.

Una categoría particular la constituyen los compuestos orgánicos capaces de liberar hidrógeno mediante reacciones químicas a temperaturas moderadas. No obstante, la cinética que rige estas reacciones y la estabilidad intrínseca de los compuestos pueden influir en gran medida sobre la eficiencia y reversibilidad del proceso. La optimización de la cinética y el estudio detenido de las condiciones de activación son elementos esenciales para lograr una liberación de hidrógeno efectiva y controlada.

Los nanotubos de carbono y los Metal-Organic Frameworks (MOFs) sobresalen por su alta área superficial y su capacidad de porosidad, atributos que favorecen la absorción de hidrógeno en sus estructuras (*Varin, R. A., Czujko, T., & Wronski, Z. S. (2009)*). No obstante, los procesos de adsorción y desorción de hidrógeno en estos materiales son susceptibles a interacciones superficiales y a la modulación de la estructura de poros. La optimización de estas propiedades requiere una comprensión profunda de los mecanismos de adsorción y desorción a nivel nanométrico, así como la adecuación de las propiedades estructurales para potenciar la capacidad de almacenamiento. *Monsalve, D. B. (s/f)*.

Los hidruros complejos, que emergen de la combinación de metales y átomos de hidrógeno, suscitan un particular interés debido a su densidad de almacenamiento de hidrógeno en términos de masa. A pesar de esta característica, la absorción y desorción de hidrógeno a menudo requieren condiciones extremas de temperatura y presión. Esta particularidad implica retos técnicos y operativos sustanciales. La exploración detallada de la cinética y de los mecanismos subyacentes en estas reacciones es esencial para optimizar la eficiencia y la viabilidad práctica de estos materiales. (*Monsalve, D. B. (s/f)*).

6. Materiales Apropriados para el Transporte y Almacenamiento de Hidrógeno.

Este capítulo se adentra en el infinito mundo de los materiales diseñados y apropiados para el transporte y almacenamiento de hidrógeno. Se explorarán tanto las propiedades y características fundamentales que hacen que ciertos materiales sean idóneos para este objetivo, así como los desafíos y avances más recientes en este campo. Desde sistemas de almacenamiento de alta densidad hasta tanques y contenedores seguros para el transporte, se descubrirá también cómo la ciencia de los materiales está desempeñando un papel esencial en la construcción de un futuro más limpio y sostenible a través del hidrógeno.

6.1. Requisitos y criterios para la selección de materiales.

Seleccionar los materiales adecuados para el transporte y almacenamiento de hidrógeno es un proceso crítico en la construcción de un sistema de energía basado en este recurso limpio, versátil y moderno. La elección de materiales no solo afecta la eficiencia y seguridad en estas operaciones, sino que también influye en la viabilidad económica y ambiental de la infraestructura de hidrógeno.

Desde ciertos factores como lo pueden ser la resistencia a la corrosión (*Resistencia a la corrosión. (s/f). Com.ar*) hasta la capacidad de almacenamiento, tanto, así como las respectivas consideraciones de seguridad, abordaremos todos y cada uno de estos factores, los cuales llegan a ser clave, a tal punto de influir en la elección de materiales para distintas aplicaciones de hidrógeno. Al entender estos requisitos y criterios especiales, los profesionales de la energía podrán tomar decisiones estratégicas e innovadoras informadas en la investigación de selección de materiales para hacer realidad este proyecto del hidrógeno como una fuente de energía limpia y prometedora.

6.2. Ejemplos de materiales óptimos.

El éxito en la transición hacia una economía basada en el hidrógeno depende de manera muy importante, de la elección de materiales adecuados que sean capaces de enfrentar los desafíos que plantea este versátil vector energético. En este capítulo, analizarán y explicarán ejemplos concretos y certeros de materiales óptimos diseñados para el transporte y almacenamiento seguro y eficiente de hidrógeno (*Coloma de Andrés, M. (2021)*).

Desde aleaciones metálicas avanzadas hasta materiales de almacenamiento sólido de alta densidad, examinaremos cómo la ciencia de los materiales ha traído ciertas innovaciones que han llegado a innovar la forma en que concebimos y utilizamos el hidrógeno como fuente de energía. A través de estos ejemplos, descubriremos cómo estos materiales están superando obstáculos y contribuyendo a la construcción de un futuro más limpio y sostenible impulsado por el hidrógeno.

Se explorarán en detalle los diversos tipos de tanques de almacenamiento utilizados en el contexto del hidrógeno. Estos tanques desempeñan un papel crucial en la infraestructura de almacenamiento y transporte de hidrógeno y presentan características específicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones (*(S/f). Academia.edu*).

6.2.1. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno a Alta Presión.

En esta sección, se profundiza en la importancia de los tanques de almacenamiento de hidrógeno a alta presión, los cuales representan componentes esenciales en la infraestructura de almacenamiento y transporte de hidrógeno comprimido. Estos tanques han sido meticulosamente diseñados para mantener el hidrógeno en estado gaseoso a presiones significativamente elevadas, lo que conlleva a una mayor densidad de almacenamiento y facilita su aplicación en diversas áreas, con especial énfasis en el sector del transporte.

El proceso de construcción de estos tanques se basa en la selección de materiales resistentes y livianos, como acero o aleaciones de aluminio reforzadas. La elección de material se ajusta a las demandas específicas de presión de operación, y en casos de presiones extremadamente altas, se emplean aceros especialmente diseñados. Adicionalmente, estos tanques de alta presión suelen contar con un revestimiento interior que previene la corrosión y garantiza la integridad estructural del tanque.

Los tanques de alta presión operan en un rango de presiones variable, desde alrededor de 350 bar hasta 700 bar o incluso más, dependiendo de la aplicación y las normativas locales. ((S/f). *Academia.edu*). Esta característica fundamental permite una densidad de almacenamiento superior, lo que se traduce en una mayor autonomía en vehículos de hidrógeno y una eficiencia mejorada en la distribución y conservación de hidrógeno comprimido.

Estos tanques son ampliamente utilizados en aplicaciones relacionadas con la movilidad, particularmente en vehículos de celdas de combustible, donde el almacenamiento a alta presión se presenta como un requisito esencial para suministrar la energía necesaria. Asimismo, encuentran aplicación en sistemas de almacenamiento de energía estacionaria, donde el hidrógeno comprimido puede ser liberado en momentos de demanda para la generación de electricidad.

La seguridad representa un aspecto prioritario en el diseño y la operación de tanques de almacenamiento de alta presión. Se implementan medidas de seguridad rigurosas, incluyendo válvulas de alivio de presión y sistemas de detección de fugas, con el fin de garantizar un funcionamiento seguro y confiable ((S/f). *Academia.edu*).

6.2.2. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno Sólido: Innovación en el Almacenamiento Seguro.

En esta sección, se ahonda en la relevancia de los tanques de almacenamiento de hidrógeno sólido, una tecnología en constante evolución que se basa en el uso de materiales sólidos, como hidruros metálicos (*Monsalve, D. B. (s/f)*), para el almacenamiento y liberación

controlada de hidrógeno. Estos tanques representan una alternativa innovadora en el contexto del almacenamiento seguro y eficiente de hidrógeno ((S/f). *Academia.edu*).

Los tanques de almacenamiento de hidrógeno sólido se distinguen por estar contruidos con materiales compuestos por hidruros metálicos y otros componentes que tienen la capacidad de absorber y liberar hidrógeno de manera reversible. Estos materiales sólidos pueden ser seleccionados y diseñados específicamente para retener hidrógeno a presiones y temperaturas adecuadas para su aplicación particular.

Una de las ventajas fundamentales de esta tecnología radica en su capacidad para almacenar hidrógeno de manera segura en forma sólida, lo que elimina los riesgos asociados con el almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido o líquido criogénico. Además, los tanques de hidrógeno sólido pueden ofrecer una densidad de almacenamiento similar o incluso superior a otros métodos de almacenamiento, lo que es esencial para aplicaciones de alta densidad de energía.

Los tanques de almacenamiento de hidrógeno sólido encuentran aplicación en una variedad de sectores, incluyendo la movilidad, la generación de energía y el almacenamiento estacionario. Además, su potencial para brindar una solución segura y versátil en la transición hacia una economía basada en el hidrógeno está siendo objeto de una creciente investigación y desarrollo.

6.2.3. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno en Nanotubos de Carbono: Exploración de su Potencial Nanotecnológico.

En esta sección, se profundiza en la temática de los tanques de almacenamiento de hidrógeno, basados en nanotubos de carbono, una innovación que aprovecha las propiedades excepcionales de los nanotubos de carbono para lograr un almacenamiento seguro y eficiente de hidrógeno. Esta tecnología representa un avance emocionante en el ámbito del almacenamiento de energía.

Los tanques de almacenamiento de hidrógeno en nanotubos de carbono se destacan por su diseño fundamentado en nanomateriales ((s/f). *Imcyc.com*). Los nanotubos de carbono, con su estructura tubular única y propiedades superficiales sobresalientes, proporcionan un entorno propicio para la adsorción y desorción controlada de hidrógeno. Esta estructura permite una capacidad de almacenamiento elevada en un espacio reducido y facilita la liberación gradual del hidrógeno.

Una de las ventajas destacadas de esta tecnología radica en su capacidad para almacenar cantidades significativas de hidrógeno en un espacio extremadamente reducido ((s/f).

Imcyc.com). Los nanotubos de carbono brindan una superficie de adsorción amplia y permiten la retención de hidrógeno a presiones moderadas y temperaturas ambientales, lo que simplifica de manera considerable la infraestructura de almacenamiento y distribución.

Los tanques de almacenamiento en nanotubos de carbono poseen aplicaciones potenciales en una amplia variedad de sectores, desde la movilidad hasta la generación de energía y la electrónica. Su capacidad para almacenar hidrógeno de forma eficaz y segura ha suscitado un gran interés en la búsqueda de soluciones avanzadas y sostenibles de almacenamiento.

6.2.4. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno en Nanopartículas de Metal: Avanzando en el Almacenamiento a Escala Nanométrica.

En esta sección, se profundiza en la importancia de los tanques de almacenamiento de hidrógeno basados en nanopartículas de metal, una innovación que aprovecha las propiedades únicas de estos materiales a nivel nanométrico para lograr un almacenamiento seguro y eficiente de hidrógeno. Esta tecnología representa un avance significativo en la capacidad de almacenamiento a una escala extremadamente pequeña.

Los tanques de almacenamiento de hidrógeno en nanopartículas de metal se destacan por su diseño basado en nanomateriales. Las nanopartículas de metal, con su relación superficie-volumen elevada y habilidad para adsorber hidrógeno, ofrecen un entorno propicio para la captura y liberación controlada de este gas. Esta estructura permite almacenar grandes cantidades de hidrógeno en un espacio sumamente reducido y facilita su liberación gradual.

Una de las ventajas clave de esta tecnología reside en su capacidad para almacenar cantidades significativas de hidrógeno a nivel nanométrico. Las nanopartículas de metal proporcionan una superficie de adsorción amplia y permiten retener el hidrógeno a temperaturas y presiones adecuadas para aplicaciones específicas, simplificando así la infraestructura de almacenamiento y distribución.

Los tanques de almacenamiento en nanopartículas de metal tienen aplicaciones potenciales en diversos sectores, desde la movilidad hasta la generación de energía y la electrónica a escala nanométrica. Su capacidad para almacenar hidrógeno de manera eficiente y segura en dimensiones nanométricas ha despertado un gran interés en la búsqueda de soluciones avanzadas y sostenibles de almacenamiento.

6.2.5. Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno en Zeolitas: Innovación en la Captura Molecular de Hidrógeno.

En esta sección, se explora la importancia de los tanques de almacenamiento de hidrógeno basados en zeolitas, una innovación que aprovecha las propiedades únicas de estas estructuras cristalinas para lograr la captura segura y eficiente de moléculas de hidrógeno. Esta tecnología representa un avance significativo en el almacenamiento a nivel molecular. del (Rosario Llop Carayol, M. (2012)).

Los tanques de almacenamiento de hidrógeno basados en zeolitas se destacan por su diseño fundamentado en estas estructuras cristalinas. Las zeolitas, con sus poros microscópicos y habilidad de adsorción selectiva, proporcionan un ambiente propicio para la captura y liberación controlada de hidrógeno a nivel molecular. Esta capacidad permite almacenar hidrógeno en forma de moléculas individuales y facilita su liberación gradual.

Una de las ventajas clave de esta tecnología reside en su capacidad para capturar y liberar hidrógeno a nivel molecular. Las zeolitas ofrecen una capacidad de adsorción selectiva y permiten retener hidrógeno bajo condiciones de temperatura y presión adecuadas para aplicaciones específicas, lo que simplifica la infraestructura de almacenamiento y distribución.

Los tanques de almacenamiento en zeolitas poseen aplicaciones potenciales en diversos sectores, desde la movilidad hasta la generación de energía y la química molecular. Su capacidad para capturar hidrógeno de manera eficiente y segura a nivel molecular ha generado un gran interés en la búsqueda de soluciones avanzadas y sostenibles de almacenamiento. (Ortega, I., & Jhonatan, F. (2020)).

6.3. Tubos de transporte.

El transporte y almacenamiento seguro del hidrógeno es un aspecto crucial en el desarrollo de la economía del hidrógeno. Dado que el hidrógeno es un gas muy ligero y puede tener propiedades inflamables, es esencial seleccionar materiales apropiados para las tuberías y sistemas de almacenamiento. Aquí hay algunos materiales comúnmente utilizados:

- **Aceros de Alta Resistencia:** Los aceros aleados de alta resistencia son a menudo utilizados en la construcción de tuberías para el transporte de hidrógeno (S/f). *Technology.club*. Estos aceros deben ser capaces de soportar las condiciones de presión y temperatura a las que se someterán durante el transporte. La resistencia a la corrosión es una propiedad importante para considerar.
- **Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (CFRP):** Los polímeros reforzados con fibra de carbono son ligeros y tienen una alta resistencia a la tracción. Estos

materiales se utilizan a menudo en la fabricación de tanques de almacenamiento de hidrógeno.

- **Recubrimientos Especiales:** Se pueden aplicar recubrimientos especiales a las tuberías y tanques para proteger contra la corrosión y reducir fugas de hidrógeno. Los recubrimientos pueden incluir polímeros específicos o revestimientos cerámicos.
- **Aleaciones de Aluminio:** En algunos casos, se han utilizado aleaciones de aluminio para componentes de sistemas de almacenamiento de hidrógeno debido a su ligereza y capacidad para formar películas de óxido que pueden proporcionar cierta protección contra la corrosión.
- **Compuestos Poliméricos de Alta Resistencia:** Materiales poliméricos de alta resistencia, como el polietileno de alta densidad (HDPE) y poliuretano, han sido utilizados para ciertas aplicaciones de almacenamiento y transporte de hidrógeno.
- **Materiales Compuestos:** Se están investigando y desarrollando materiales compuestos avanzados que combinan polímeros y fibras de refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia química.
- **Cerámicas Específicas:** En aplicaciones donde la resistencia a la corrosión es crítica, algunas cerámicas específicas pueden ser adecuadas para el contacto con hidrógeno.

6.4. Almacenamiento sólido de hidrógeno.

El almacenamiento sólido de hidrógeno presenta desafíos únicos, ya que implica la absorción y liberación reversible de hidrógeno en un material sólido. Aquí hay algunos materiales comúnmente utilizados para el almacenamiento sólido de hidrógeno:

- **Hidruros Metálicos:** Algunos metales y aleaciones forman compuestos conocidos como hidruros metálicos, que pueden absorber y liberar hidrógeno. Ejemplos incluyen hidrocarburos de magnesio, litio y sodio.
- **Materiales Orgánicos:** Se han investigado materiales orgánicos, como ciertos polímeros porosos, que pueden absorber hidrógeno en su estructura molecular.
- **Zeolitas:** Estos son minerales microporosos que pueden absorber hidrógeno en sus poros. Las zeolitas modificadas se han estudiado para mejorar la capacidad de almacenamiento. *Curi, Adilson, Granda, Wilmer J. V, Lima, Hernani M, & Sousa, Wilson T. (2006).*

- Carburos Metálicos: Compuestos de carbono y metal, como los carburos metálicos, han demostrado ser prometedores para el almacenamiento de hidrógeno.
- Materiales Compuestos: Combinaciones de materiales, como nanopartículas de metales con soportes porosos, pueden mejorar la capacidad de almacenamiento, es importante destacar que el almacenamiento sólido aún está en una fase de investigación y desarrollo.

A modo de resumir y acortar todo lo que en este capítulo se expresó, se presenta la siguiente tabla, la cual se divide entre materiales. Sistemas de almacenamiento y características propias de cada material, a modo de hacer entender de una mejor manera;

Tabla 3.

Resumen de los resultados.

Material	Tipo de Almacenamiento / Transporte	Características Principales
Acero	Tanques de alta presión	Resistente, pero propenso a la fragilización por Hidrógeno
Aleaciones Ti	Tanques de alta presión	Mayor resistencia y menor fragilización que el Acero
Compuestos a partir de Hidruros Metálicos	Tanque de alta presión y almacenamiento sólidos	Almacenamiento denso del Hidrógeno, pero requiere altas temperaturas para su liberación
CFRP	Tanques de alta presión	Ligeros y fuertes, pero costosos
Hidruros Orgánicos	Almacenamiento Sólido	Almacenamiento seguro a baja presión y a temperatura ambiente
Líquidos Orgánicos	Almacenamiento Líquido	Hidrocarburos líquidos que absorben y liberan hidrógeno reversiblemente.
Materiales Adsorbentes	Almacenamiento por adsorción	Superficies porosas que adsorben y liberan hidrógeno fácilmente.
Zeolitas	Almacenamiento por adsorción	Estructuras cristalinas con poros que adsorben hidrógeno.

Nota. Se encuentran los resultados obtenidos después del análisis de las propiedades y el tipo de almacenamiento.

6.5. Discusión de Resultados.

La discusión de resultados es una parte fundamental de cualquier tesis de investigación, ya que permite analizar y presentar los hallazgos clave obtenidos durante el desarrollo del estudio.

En el análisis de la literatura, se encontró que existen varios tipos de materiales utilizados para el almacenamiento de hidrógeno, incluyendo almacenamiento en forma de hidruros metálicos, materiales adsorbentes y sistemas de almacenamiento criogénico, se observa una tendencia hacia el desarrollo de materiales de almacenamiento de alta capacidad, con un énfasis creciente en la eficiencia energética y la capacidad de liberación controlada de hidrógeno. Además, se han realizado avances significativos en la mejora de la cinética de absorción y desorción de hidrógeno en los materiales, a continuación, se va a presentar en una tabla en la que se muestran los materiales más idóneos, explicando precisamente características y sistemas de almacenamiento encontrados.

Tabla 4.

Discusiones sobre los materiales analizados.

Tipo de Material	Características	Sistemas de Almacenamiento
Hidruros Metálicos	Alta capacidad de almacenamiento de H ₂ , buena conductividad térmica, pueden operar a temperaturas moderadas, reversibilidad	Adsorción en sólidos, almacenamiento criogénico, tanques a presión
Materiales Adsorbentes	Alta área superficial, adsorción/desorción rápida, buena selectividad, regeneración posible	Adsorción en sólidos, almacenamiento criogénico, tanques a presión
Nanomateriales	Alta relación superficie-volumen, propiedades únicas a nanoescala, tamaño nanométrico	Almacenamiento en líquidos, nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono

Nota. Se encuentran los materiales y el tipo de almacenamiento mas apropiado, junto con sus características

7. Conclusiones.

Este documento ha dado vistas a la problemática y, también a la importancia crítica de seleccionar materiales idóneos en esta esfera tecnológica vital. La revisión de la literatura ha permitido identificar tanto los materiales convencionales como aquellos innovadores, proporcionando una comprensión profunda de los desafíos inherentes y los desarrollos recientes en esta área. El análisis presentado de los efectos del hidrógeno en las propiedades

fisicoquímicas de los materiales ha resaltado la necesidad de una evaluación meticulosa para garantizar la integridad y eficiencia en el transporte y almacenamiento del hidrógeno. Como resultado, se ha establecido una base sólida para la selección precisa de materiales, considerando aspectos cruciales como la durabilidad, resistencia a la corrosión y capacidad de almacenamiento.

Después de un análisis exhaustivo sobre los materiales utilizados en el transporte y almacenamiento de hidrógeno, se destaca la notable importancia de los compuestos de carbono, especialmente en forma de nanomateriales, como la opción más prometedora. Su capacidad para proporcionar una combinación única de porosidad elevada, resistencia estructural y facilidad de manejo los sitúa como líderes en el diseño de sistemas eficientes y seguros para la gestión del hidrógeno. Este enfoque no solo aborda los desafíos actuales relacionados con la adsorción y desorción de hidrógeno, sino que también allana el camino hacia soluciones sostenibles y económicamente viables en el ámbito del transporte y almacenamiento de hidrógeno.

8. Recomendaciones.

- **Investigación en nuevos materiales:** A pesar de los avances realizados en el campo del transporte y almacenamiento de hidrógeno, aún existen áreas que requieren más estudio y desarrollo. Se recomienda investigar y desarrollar nuevos materiales con propiedades mejoradas, como una mayor capacidad de almacenamiento, una cinética de absorción y desorción más rápida y una mayor estabilidad térmica.
- **Optimización de la eficiencia:** Es importante seguir investigando y desarrollando tecnologías que mejoren la eficiencia en el transporte y almacenamiento de hidrógeno. Esto incluye la optimización de los sistemas de almacenamiento, la mejora de la cinética de absorción y desorción, y la reducción de las pérdidas durante el proceso.
- **Seguridad y gestión de riesgos:** La seguridad es un aspecto crucial en el transporte y almacenamiento de hidrógeno. Se recomienda realizar investigaciones adicionales sobre estrategias de seguridad, detección de fugas y gestión de riesgos para garantizar un manejo seguro del hidrógeno.
- **Desarrollo de infraestructura:** Para promover la adopción generalizada del hidrógeno como fuente de energía, es necesario desarrollar una infraestructura adecuada. Se recomienda investigar y desarrollar tecnologías y sistemas para el almacenamiento, distribución y suministro de hidrógeno a gran escala.
- **Integración con energías renovables:** El hidrógeno puede desempeñar un papel importante en la transición hacia un sistema energético más sostenible. Se recomienda investigar y desarrollar tecnologías que permitan la producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, para garantizar su producción sostenible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Referencias Bibliográficas

- [1]. ¿Qué es el Hidrógeno y cuáles son sus aplicaciones? - Fenoge. (s. f.). Fenoge.
- [2]: Rodríguez, H. (2022, 16 septiembre). Propiedades del hidrógeno (H).
- [3]: Álvarez, D. O. (2021). Hidrógeno: propiedades, usos, características y riesgos. Enciclopedia Humanidades.
- [4]: Gonzalez García-Conde, Andrés. (2010). Producción, Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno.
- [5]: Bon Navaid, Humza; Emadi, Hossein; Watson, Marshall. (2022). "A comprehensive literature review on the challenges associated with underground hydrogen storage." ("A comprehensive literature review on the challenges associated with ...") ("A comprehensive literature review on the challenges associated with ...")
- [6]: Hu, Qingchun; Zhang, Xihong; Hao, Hang. (2023). A review of hydrogen-air cloud explosions: The fundamentals, overpressure prediction methods, and influencing factors.
- [7]: Sun, Changyo; Wang, Chenxi; Ha, Taejun; Lee, Joonho; Shim, Jae-Hyeok; Kim, Yunseok. (2023). A brief review of characterization techniques with different length scales for hydrogen storage materials. ("A brief review of characterization techniques with different length ...")
- [8]: ¿Qué información se debe presentar? La información requerida y la periodicidad de su entrega se encuentran en el formulario electrónico disponible en la Oficialía de Partes Electrónica (OPE). (s/f). Gob.mx.
- [9]: NANOTECNOLOGIA Y ARQUITECTURA. (s/f). Imcyc.com.
- [10]: Resistencia a la corrosión. (s/f). Com.ar. Recuperado el 3 de octubre de 2023, de <https://www.famiq.com.ar/informacion-tecnica/resistencia-corrosion>.
- [11]: MANUAL PROCEDIMIENTOS E INTERPRETACION DE RESULTADOS/ REVISION TECNICA TIPO A2 CUARTA PARTE Versión 13.2 Actualizada al 16 de junio de 2014.
- [12]: Curi, Adilson, Granda, Wilmer J. V, Lima, Hernani M, & Sousa, Wilson T. (2006). "Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros." ("Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes ...") *Información tecnológica*, 17(6), 111-118. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>.
- [13]: Páez, C. E. C. (s/f). PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.
- [14]: M. Gisela Orcajo, Juan A. Botas, Guillermo Calleja, Manuel Sánchez-Sánchez. (2011). Materiales MOF para el almacenamiento de hidrógeno.

- [15]: Monsalve, D. B. (s/f). ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO MEDIANTE HIDRUROS METÁLICOS: SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN.
- [16]: del Rosario Llop Carayol, M. (2012). "Estudio espectroscópico y termodinámico de la adsorción de hidrógeno en zeolitas ("Estudio espectroscópico y termodinámico de la adsorción de hidrógeno en ...") Universitat de les Illes Balears.
- [17]: Ortega, I., & Jhonatan, F. (2020). ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN ZEOLITA TIPO ZTC (ZEOLITE TEMPLATED CARBON). Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (RI ...) Tecnológico Nacional de México.
- [18]: Aguado Molina, R., Casteleiro Roca, J.L., Jove Pérez, E., Zayas Gato, F., Quintián Pardo, H., Calvo Rolle, J.L. (2021). ("Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica") Coruña.
- [19]: González Alberdi, C. (2020). ("CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ... - us") ("CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ... - us") (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [20]: (S/f). Academia.edu. Sistemas de Almacenamiento.
- [21]: Coloma de Andrés, M. (2021). El vehículo de hidrógeno. Almacenamiento de hidrógeno en polímeros de microporosidad intrínseca (PIMs).
- [22]: (Kyotani T. In: Yasuda E, Inagaki M, Kaneko K, Endo M, Oya A, Tanabe Y, editors. Carbon alloys. (2003)). Novel concepts to develop carbon science and technology. Oxford: Elsevier Science; p. 109–42.
- [23]: Muthukumar P et al., Review on large-scale hydrogen storage systems for better sustainability, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.304>
- [24]: Sankir, M & Sankir, N.D. (2018), Hydrogen Storage Technologies.
- [25]: Broom. Darren P, (2011), Hydrogen Storage Technologies: The Characterisation of Their Storage Properties.
- [26]: Godula-Joperk, A, Jehle, W & Wellnitz, J, (2012), Hydrogen Storage Technologies: New Materials, Transport and Infrastructure.
- [27]: Klebanoff, L (2013), Hydrogen Storage Technology: Materials and Applications.
- [28]: European Communities. (2003). Hydrogen Storage: State-of-the-art and Future Perspective. Office for Official Publications of the European Communities.
- [29]: Varin, R. A., Czujko, T., & Wronski, Z. S. (2009). Nanomaterials for Solid State Hydrogen Storage. Springer.

[30]: Wang C et al., Solid-state electrochemical hydrogen sensors: A review, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.167>