

**El hidrógeno y los hidruros metálicos: Avances en almacenamiento y aplicaciones sostenibles.**

David Andrés Lozano Méndez.

Trabajo de grado, presentado como requisito para optar el título de ingeniero metalúrgico.

Director  
Darío Yesid Peña Ballesteros  
PhD. en Corrosión

Universidad Industrial de Santander  
Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas  
Escuela De Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales  
Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

A mi madre, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor inspiración y motivación en este viaje académico. A mi familia y amigos, por la comprensión y compañía a lo largo de este camino de esfuerzo universitario. A mi esfuerzo propio, por el sacrificio, dedicación y perseverancia en esta etapa de mi vida.

### **Agradecimientos**

Quiero dedicar este espacio para expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que han sido fundamentales en mi camino hacia la culminación de mi tesis.

A mi madre, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi mayor inspiración en cada paso de este camino académico.

A mis profesores y asesores, por su orientación experta, valiosos consejos y apoyo académico que han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A mis amigos y compañeros de clase, por compartir conmigo momentos de alegría, desafíos y por ser una fuente inagotable de motivación.

Agradezco profundamente a cada uno de ustedes por su contribución a este proyecto y por formar parte de este importante capítulo en mi vida académica.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
2. Marco teórico .....	15
2.1 Producción de hidrógeno .....	15
2.1.1 <i>Reformado de vapor de metano (SMR)</i> .....	15
2.1.2 <i>Electrolisis alcalina</i> .....	15
2.1.3 <i>Electrolisis PEM</i> .....	15
2.1.4 <i>Electrolisis de óxido sólido (SOE)</i> .....	16
2.1.5 <i>Procesos biológicos</i> .....	16
2.2. Tecnologías con hidrógeno .....	17
2.2.1 <i>Aplicaciones estacionarias</i> .....	17
2.2.2 <i>Aplicaciones de transporte</i> .....	17
2.2.3 <i>Importancia de los hidruros metálicos</i> .....	17
2.2.4 <i>Celdas de combustible</i> .....	18
2.2.5 <i>Combustión interna (ICE)</i> .....	19
2.3. Métodos de almacenamiento de hidrógeno.....	19
2.3.1 <i>Adsorción</i> .....	19
2.3.2 <i>Compresión</i> .....	19

2.3.3 <i>Licuefacción</i> .....	20
2.4 Almacenamiento por Hidruros metálicos .....	21
2.4.1 <i>Hidruros metálicos complejos</i> .....	21
2.4.2 <i>Alanatos</i> .....	22
2.4.3 <i>Borohidruros</i> .....	22
2.4.4 <i>Hidruros metálicos elementales</i> .....	23
2.4.4.1 Hidruros intermetálicos.....	23
2.5 Propiedades de almacenamiento .....	24
2.5.1 <i>Capacidad gravimétrica</i> .....	24
2.5.2 <i>Capacidad volumétrica</i> .....	25
2.5.3 <i>Reversibilidad</i> .....	25
2.5.3.1 Densidad energética volumétrica.....	25
2.6 Propiedades de operación .....	25
2.6.1 <i>Ciclo de estabilidad</i> .....	25
2.6.2 <i>Presión/temperatura de operación</i> .....	26
2.6.3 <i>Rango de Carga</i> .....	26
2.7 Propiedades termodinámicas .....	26
2.7.1 <i>Cinética de absorción/desorción</i> .....	26
2.7.2 <i>Energía de activación</i> .....	26
2.7.3 <i>Histéresis</i> .....	27
3.Artículos de investigación.....	27
3.1 Tanque cilíndrico de hidruro <b>La0.9Ce0.1Ni5</b> a diferentes condiciones de operación.....	27

3.2 Hidruro metálico como bomba de calor.....	28
3.3 Hidruros metálicos en aplicaciones navales .....	29
3.4 Hidruros metálicos con celda de combustible PEM a baja temperatura ( $T \leq 100^{\circ}\text{C}$ ) .....	30
3.5 Integración térmica en celda PEM con hidruro metálico.....	33
3.6 Sistema híbrido en equipos de montacarga de 3 toneladas de capacidad. ....	34
3.7 Hidruros metálicos en baterías de níquel .....	35
4. Discusión.....	38
4.1 Optimización operativa de una celda de combustible mediante el control térmico del hidruro metálico.....	38
4.2 Coeficiente de eficiencia de una bomba de calor fabricada por un par de hidruros metálicos. ....	39
4.3 Optimización de la autonomía de un submarino.....	39
4.4 Hidruros metálicos e hidrógeno de gas comprimido para alimentar sistemas con celdas de combustible PEM.....	40
4.5 Regulación térmica de celda de combustible PEM alimentada por hidruro metálico .....	41
4.6 Integración de sistemas híbridos de almacenamiento de hidrógeno para eficiencia y sostenibilidad en equipos de montacargas .....	42
4.7 Influencia de elementos multicomponentes en la estabilidad de baterías níquel-metal hidruro .....	42
Conclusiones.....	44
Referencias bibliográficas.....	46

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Comparación de tecnologías de almacenamiento</i> .....	20
Tabla 2 <i>Ventajas y desventajas de los hidruros intermetálicos</i> .....	24
Tabla 3 <i>Diseños de tanques de hidruros metálicos usados con celdas PEM</i> .....	31

## Lista de Apéndices

	pág.
<b>Apéndice A.</b> <i>Esquema de celda electrolítica PEM (Arimandi et al. 2023).</i> .....	52
<b>Apéndice B.</b> <i>Esquema de electrolisis de oxido solido (Kumar &amp; Himabindu, 2019)</i> .....	52
<b>Apéndice C.</b> <i>Diferentes tipos de celda de combustible y sus parámetros clave (Li et al., 2024).</i> .....	53
<b>Apéndice D,</b> <i>Estructura de Mg<sub>2</sub>Ni (a) y su hidruro(b). Mg verde, Ni azul oscuro, Hidrógeno azul claro (Wu et al., 2013).</i> .....	53
<b>Apéndice E.</b> <i>Propiedades del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos complejos (Desai,2023)</i> .....	54
<b>Apéndice F.</b> <i>Propiedades de hidruros intermetálicos (Desai, 2023).</i> .....	54
<b>Apéndice G.</b> <i>Flujo de temperatura en tanque cilíndrico durante el proceso de absorción (Elkhatib &amp; Louahlia-Gualous, 2023).</i> .....	55
<b>Apéndice H.</b> <i>Resultados de incremento del porcentaje de volumen (Fiori,2015).</i> .....	55
<b>Apéndice I.</b> <i>Sistema de hidruro metálico con PEM celda de combustible (Førde, 2009)</i> .....	56
<b>Apéndice J.</b> <i>Influencia de la temperatura en el proceso de desorción con presión de 2 bar (Førde, 2009).</i> .....	56
<b>Apéndice K.</b> <i>Sistema hibrido de montacarga (Lototsky, 2016).</i> .....	57
<b>Apéndice L.</b> <i>Ciclo de estabilidad LaNi<sub>5</sub> (Notten, 1995).</i> .....	57
<b>Apéndice M.</b> <i>Capacidad de almacenamiento final para diferentes aleaciones intermetalicas (Notten, 1995).</i> .....	58
<b>Apéndice N.</b> <i>Microscopia electrónica de barrido LaNi<sub>5</sub> (Notten, 1995).</i> .....	58

**Apéndice O.** *Micrografía hidruros Intermetálicos a 750 ciclos de carga y descarga (Notten, 1995).* ..... 59

### Resumen

**Título:** El hidrógeno y los hidruros metálicos: Avances en almacenamiento y aplicaciones sostenibles.\*

**Autor:** David Andres Lozano Mendez \*\*

**Palabras Clave:** Hidrógeno, hidruro metálico, almacenamiento, energía renovable

**Descripción:** Se aborda la importancia del almacenamiento de hidrogeno mediante hidruros metálicos en diferentes aplicaciones industriales tales como bombas de calor, baterías, tanques de almacenamiento, vehículos monta carga, conexiones con celdas de combustible PEM y aplicaciones navales. Además, se investiga sobre las propiedades de los hidruros metálicos organizándolas propiedades de almacenamiento, operación y termodinámica. También se realizo un estudio de tecnologías de producción de hidrogeno. En la conclusión se detalla las gestiones requeridas para el proceso de absorción/desorción optimo, la influencia de los compuestos solidos para reemplazar a los compuestos intermetálicos y la optimización de la eficiencia energética y vida útil de los hidruros metálicos.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad De Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Dr. Darío Yesid Peña Ballesteros.

**Abstract**

**Title:** Hydrogen and metal hydrides: storage improvements and sustainable applications.\*

**Author(s):** David Andrés Lozano Méndez \*\*

**Key Words:** Hydrogen, metal hydrides, Storage, renewable energy.

**Description:** The importance of hydrogen storage through metal hydrides is addressed in various industrial applications such as heat pumps, batteries, storage tanks, forklifts, connections with PEM fuel cells, and naval applications. Additionally, research is conducted on the properties of metal hydrides, organizing them into storage, operational, and thermodynamic properties. A study of hydrogen production technologies is also carried out. The conclusion details the necessary actions for optimal absorption/desorption processes, the influence of solid compounds to replace intermetallic compounds, and the optimization of energy efficiency and lifespan of metal hydrides.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering, Department of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Dr. Darío Yesid Peña Ballesteros

## Introducción

El incremento de la demanda energética mundial agota alarmantemente la disponibilidad de los combustibles fósiles, considerando que son recursos no renovables y además estos son la principal fuente de gases de efecto invernadero de efecto invernadero se ha generado la necesidad de implementar fuentes alternativas para la producción de energía (Dahari, 2016).

El hidrógeno puede ser obtenido desde diferentes fuentes renovables que no producen gases de efecto invernadero como el sol, el viento y la biomasa. Por lo tanto, desarrollar esta alternativa permite tener energía limpia y sustentable (Sharma, 2023).

Básicamente el almacenamiento consiste en la forma estacionaria y la forma de transporte. Es sumamente importante alcanzar la mayor eficiencia en el almacenamiento de hidrógeno apto para transporte y así propagar esta tecnología y conseguir la sustitución de los combustibles fósiles por esta energía limpia (Hirscher, 2007).

Los dos métodos tradicionales del almacenamiento de hidrógeno consisten en almacenarlo en estado líquido a temperatura criogénica o en estado gaseoso el cual debe estar altamente presurizado, ambos métodos ocasionan altos costos de mantenimiento y volviendo el transporte del hidrógeno en una tarea compleja, costosa y peligrosa (Pan, 2023).

El método de almacenar el hidrógeno en estado líquido incrementa la densidad volumétrica lo cual en primera impresión suena favorable, pero es necesario mantener el hidrógeno a menos de  $-253\text{ °C}$  para que permanezca en estado líquido. Por otra parte, el método de gas altamente presurizado requiere tanques apropiados para soportar altas presiones y el material de estos debe ser compacto, ligero y resistente a las explosiones en caso de una colisión debido a que el hidrógeno es inflamable (Hirscher, 2007).

Otra forma es el almacenamiento de hidrógeno gaseoso es el almacenamiento en metales que son capaces de absorber el hidrógeno, los cuales son conocidos como hidruros metálicos, dicha técnica se ha vuelto muy popular debido el incremento de la densidad gravimétrica obteniendo estructuras compactas y aumentando la seguridad ya que se reduce el riesgo ocasionado por la inflamabilidad del hidrógeno (Pan, 2023).

Pero de igual manera los hidruros metálicos significan un reto para la ingeniería ya que los materiales para almacenar hidrógeno deben poseer unas específicas propiedades como baja temperatura de absorción, baja temperatura de desorción, altas tasas de hidrogenación y deshidrogenación, una muy buena reversibilidad una alta densidad volumétrica y además debería ser económico para lograr hacer accesible el almacenamiento a los diferentes consumidores (Dahari, 2016).

¿La tecnología aplicada hoy en día logra resolver estos desafíos y estamos listos para la transición energética a nivel mundial?

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Analizar la importancia de los hidruros metálicos en el almacenamiento de hidrógeno a partir de sus propiedades y su aplicación en la actualidad.

### **1.2 Objetivos específicos**

Mediante revisión bibliográfica investigar y describir las propiedades de los hidruros metálicos.

Revisar los avances en tecnologías de almacenamiento de hidrógeno basadas en hidruros metálicos y algunas aplicaciones industriales en la actualidad.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Producción de hidrógeno

#### 2.1.1 *Reformado de vapor de metano (SMR)*

Este método consiste en una reacción de metano y vapor de agua con un catalizador para obtener hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Luego con la reacción de desplazamiento del gas de agua (WGSR) el monóxido de carbono reacciona con el vapor de agua para formar dióxido de carbono y más hidrógeno. Por último, el dióxido de carbono es atrapado y reutilizado en diferentes procesos industriales. El SMR es un proceso muy eficiente que produce hidrógeno de alta pureza y además es respetuoso con el medio ambiente ya que no libera gases de efecto invernadero. (Song H, 2022).

#### 2.1.2 *Electrolisis alcalina*

En la electrolisis alcalina para producción de hidrógeno es un proceso electroquímico, el electrolito alcalino (hidróxido de sodio o potasio) se disuelve en agua. Esta solución proporciona iones que conducen electricidad. Al aplicar una corriente eléctrica al sistema, en el ánodo el agua se descompone en iones de hidrógeno ( $H^+$ ) y iones de oxígeno ( $O_2^-$ ) y en el cátodo ocurre la reducción del agua donde se convierten en  $H_2$  e iones de hidrógeno ( $OH^-$ ). Luego se recolecta el hidrógeno y el oxígeno producido. (Kumar & Himabindu, 2019).

#### 2.1.3 *Electrolisis PEM*

El método PEM utiliza un polímero conductor de protones (membrana) entre el cátodo y el ánodo que permite a los protones ( $H^+$ ) cruzar. Cuando se aplica una corriente eléctrica el agua se descompone en el ánodo para formar  $O_2$  y  $H^+$ . Los electrones viajan en un circuito externo y

los protones cruzan la membrana para llegar al cátodo donde los protones  $H^+$  reaccionan con los electrones y forman hidrógeno gaseoso. El PEM es muy utilizado en las celdas de combustible de hidrógeno. La reacción en el ánodo es  $2H_2O \rightarrow O_2^- + 4H^+ + 4e^-$  y la reacción en el cátodo es  $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$  (Arjmandi et al., 2023). En el apéndice A se observa gráficamente el proceso de electrolisis PEM.

#### **2.1.4 *Electrolisis de óxido sólido (SOE)***

Es un proceso electroquímico que mediante una membrana de óxido sólido (electrolizador) el vapor de agua se descompone en hidrógeno y oxígeno moleculares, el proceso ocurre a altas temperaturas (800°C). En el cátodo el vapor de agua se combina con electrones del circuito externo para formar  $H_2$  y  $O_2^-$ . Los iones de oxido pasan por la membrana y reaccionan en el ánodo para formar oxígeno gaseoso y generar electrones para el circuito externo que luego reaccionaran con el vapor de agua en el cátodo (Kumar & Himabindu, 2019).

En el apéndice B se observa la ilustración grafica del proceso de electrólisis de óxido sólido (SOE)

#### **2.1.5 *Procesos biológicos***

La producción de hidrógeno biológico emerge como una alternativa. En este contexto, la cultivación de algas se presenta como una etapa crucial, donde microorganismos fotosintéticos transforman la luz solar en energía química, facilitando así la acumulación de biomasa. El proceso de fotofermentación permite la conversión de esta biomasa en hidrógeno a través de microorganismos fotosintéticos que emplean la luz solar y utilizan compuestos orgánicos como sustrato. La fermentación oscura, a su vez, juega un papel fundamental al descomponer moléculas

orgánicas complejas y generar hidrógeno como producto final. Las celdas de electrólisis microbiales complementan este ciclo al aprovechar la actividad de bacterias electroactivas que catalizan la conversión electroquímica de compuestos orgánicos en hidrógeno (Thanh Tuan Le, 2023).

## **2.2. Tecnologías con hidrógeno**

### **2.2.1 Aplicaciones estacionarias**

Debido a su alta densidad de energía volumétrica y baja presión de operación son de gran ventaja porque son seguros, económicos y no requieren tanto mantenimiento como otros sistemas (Hirscher, 2007). Se pueden utilizar en instalaciones fijas por ejemplo en hogares para almacenar energía proveniente de un sistema fotovoltaico, incluso en vecindarios para almacenar la energía de los hogares. El hidrógeno también puede utilizarse en sistemas de calefacción y refrigeración reemplazando el gas natural. Aplicaciones industriales como en la industria química que necesita hidrógeno para su producción y así fomenta la huella verde en este sector industrial (Hassan,2018).

### **2.2.2 Aplicaciones de transporte**

Es una de las áreas más destacadas para el uso del hidrógeno como vector energético. Las celdas de combustible de hidrógeno en diferentes vehículos pueden ser alimentadas por los hidruros metálicos gracias a su favorable capacidad de almacenamiento, pero teniendo como limitante el espacio y conveniencia económica (Drawer, 2023).

### **2.2.3 Importancia de los hidruros metálicos**

El almacenamiento de hidrógeno de hidruro metálico es muy ventajoso debido a la alta densidad volumétrica en presiones bajas, ya que puede ser hasta el doble. El bajo peso total es

necesario y esencial en las aplicaciones de transporte en cambio en las aplicaciones estacionarias no es considerado muy importante ya que se busca compacidad debido a la alta densidad volumétrica del hidrógeno atómico acomodado en la estructura cristalina de la matriz del hidruro metálico. (Førde, 2009).

#### **2.2.4 Celdas de combustible**

Las celdas de combustible están conformadas esencialmente por el ánodo, el cátodo y el electrolito. Sencillamente su funcionamiento consiste en que el hidrógeno (combustible) que entra por el ánodo y el oxígeno (oxidante) que entra por el cátodo reaccionan químicamente, esta reacción ocurre porque está presente el electrolito que permite el intercambio de iones. En el ánodo el hidrógeno se oxida creando protones  $H^+$  y electrones que van a fluir mediante un circuito externo, los electrones llegan al cátodo donde reaccionan con el oxígeno y los protones  $H^+$  produciendo agua. Los electrones que van por el circuito externo pueden utilizarse para alimentar el sistema de interés y además la celda libera calor lo que puede utilizarse en otras aplicaciones (Thanh Tuan Le, 2023).

Existen diversos tipos de celdas de combustible según sus materiales de fabricación o combustible utilizado, por ejemplo: celdas alcalinas (AFC), celdas de ácido fosfórico (PAFC), celdas de carbonato (PAFC), celdas de oxido solido (SOFC), membrana de intercambio de hidrógeno (PEMFC) y celdas de metanol (DMFC) (Li et al., 2024).

En el siguiente apéndice C se puede observar de forma resumida las diferentes características de los diferentes tipos de celdas.

### **2.2.5 Combustión interna (ICE)**

Es una tecnología con mucho potencial para la industria automotriz, debido a que mantiene en funcionamiento los clásicos motores de combustión interna con la mejora que no emite gases de efecto invernadero porque los gases producto de la combustión de hidrógeno es vapor de agua. El hidrógeno gaseoso que es almacenado en el tanque del vehículo es inyectado en la cámara de combustión donde se mezcla con aire. Al ocurrir la ignición se obtiene una explosión controlada que provee energía mecánica al sistema de la misma forma cómo funciona la gasolina a diferencia que el ICE es más eficiente porque el hidrógeno tiene mayor energía contenida por unidad de peso (Bui VG, 2022).

## **2.3. Métodos de almacenamiento de hidrógeno**

### **2.3.1 Adsorción**

Esta técnica implica el uso de un material poroso que almacene las moléculas de hidrógeno a baja presión y que a su vez libere el hidrógeno cuando ocurre una disminución de la temperatura o presión. Los materiales usados suelen ser carbón activado, compuestos metal-orgánicos (MOFs) y zeolitas (Peschel A, 2020).

### **2.3.2 Compresión**

Consiste en comprimir gas de hidrógeno alrededor de los 350-700 *bar* con el propósito de aumentar su densidad y disminuir el volumen para almacenarlo en un tanque. La Compresión mecánica comprime mediante compresores o bombas, no es tan costosa y es relativamente fácil de realizar, aunque consumen mucha energía y libera mucho calor. La compresión criogénica consiste en enfriar el gas hasta que sea líquido ( -253 °C) y comprimir el líquido, libera menos energía y

facilita el almacenamiento por su densidad, aunque es de alto costo y complejidad (Ustolin F, 2020).

### 2.3.3 Licuefacción

Consiste en transformar el gas de hidrógeno en estado líquido y almacenar el líquido en tanques a baja temperatura (criogénica). Empleado para transporte de altas cantidades, es un mecanismo costoso y complejo que además genera preocupaciones por su inseguridad (Zhang T, 2023).

En la siguiente tabla se presenta una tabla comparativa de las diferentes tecnologías de almacenamiento según las ventajas, desventajas y avances.

**Tabla 1.**

*Comparación de tecnologías de almacenamiento*

<b>Tecnología</b>	<b>Adsorción</b>	<b>Compresión</b>	<b>Licuefacción</b>
<b>Ventajas</b>	Excelente capacidad de almacenamiento a baja presión.	Frecuentemente utilizado en industria y almacena considerables cantidades de hidrógeno	Excelente densidad de almacenamiento
<b>Desventajas</b>	Complejidad en mantener el líquido frío y estable. Técnica costosa.	Tanques y compresores especializados. Alto consumo de energía y técnica riesgosa.	El proceso de adsorción es muy lento comparado con otras técnicas.
<b>Avances</b>	El uso de materiales aislantes ha sido útil en mantener el líquido frío y estable	Uso de materiales modernos disminuye el peso de los tanques y aumenta la capacidad, aunque	Avances en la síntesis de MOFs han creado materiales mucho más absorbentes a menor costo.

sigue considerándose  
una técnica riesgosa.

**Nota.** Adaptado de Thanh Tuan Le et al., (2023)

## **2.4 Almacenamiento por Hidruros metálicos**

Los hidruros metálicos son sustancias que tienen la capacidad de incorporar átomos de hidrógeno en sus enlaces químicos. Su ventaja es que almacena átomos de hidrógeno a alta densidad, quiere decir que comparado con los gases o líquidos con un menor volumen almacena la misma cantidad de hidrógeno (Karmakar A, 2021).

Mediante polvo fino de metales puros o aleaciones de metal se pueden romper los enlaces covalentes de las moléculas de hidrógeno quedando estos dos conectados químicamente. Esto conocido como proceso de absorción, llevando a cabo una reacción exotérmica e incorporando el hidrógeno a la estructura química y así formando el hidruro metálico. Para liberar al hidrógeno del hidruro metálico se debe suministrar calor, llevando a cabo una reacción endotérmica y esto es conocido como proceso de desorción (Hassan,2018).

En el apéndice D se ilustra de forma didáctica como se almacena el hidrógeno en el hidruro metálico.

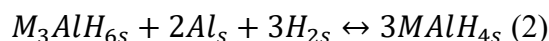
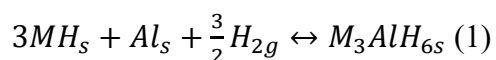
### **2.4.1 Hidruros metálicos complejos**

Los hidruros metálicos complejos consisten en un metal ligero junto a un anión que se unen con el hidrógeno. Usualmente los aniones son hidruros de aluminio, hidruros de boro y aminas. Los metales ligeros usualmente son litio, sodio, magnesio, boro y aluminio. Por su peso ligero son muy factibles para aplicaciones en vehículos. (Furukawa, 2013).

En el apéndice E se presenta diferentes propiedades de los hidruros metálicos complejos más comercializados.

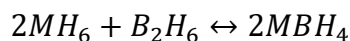
### 2.4.2 Alanatos

Los alanatos más comunes son aquellos hechos por metales alcalinos y aluminio. Por ejemplo, los alanatos de sodio  $NaAlH_4$ , calcio  $Ca(AlH_4)_2$ , potasio  $KAlH_4$ , litio  $LiAlH_4$ . Por lo general los alanatos siguen el siguiente proceso químico donde MH es el hidruro metálico cualquiera que puede ser producido por metales alcalinos (Na, Ca, K, Li) (Desai,2023):



### 2.4.3 Borohidruros

Los borohidruros más comunes son los de calcio ( $Ca(BH_4)_2$ ), magnesio ( $Mg(BH_4)_2$ ), zinc ( $Zn(BH_4)_2$ ) y litio ( $Li(BH_4)_2$ ). Se sintetizan con la siguiente ecuación química:



Son hidruros estables que tienen hasta 9.6 % wt en densidad gravimétrica sin embargo cuenta con una alta estabilidad termodinámica lo que conlleva a una baja cinética provocando la formación de borano. El borano es un subproducto volátil indeseable (Schlesinger & Brown, 1940).

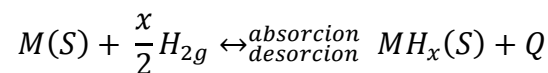
#### 2.4.4 *Hidruros metálicos elementales*

Los conocidos como hidruros elementales son los hidruros metálicos más simples químicamente, constan de un único elemento metálico puro al cual se une el hidrógeno (Drawer, 2023).

El hidruro metálico elemental con mayor ventaja son los que están hecho con magnesio (mg) ya que son los que contienen mayor densidad gravimétrica (7.6% wt) en comparación con los otros hidruros elementales. Presenta otro tipo de problema como un corto ciclo de vida, bajo rendimiento en los procesos de absorción/desorción. (Zhou, 2022)

**2.4.4.1 Hidruros intermetálicos.** Los hidruros intermetálicos consisten en una aleación de dos metales en el cual un metal se une fuertemente al hidrógeno y el otro elemento metálico se une débilmente. Su densidad gravimétrica en promedio no excede el 2%wt. Debido a su poca disponibilidad se limita al uso en el sector nuclear (Drawer, 2023).

Formados por la ecuación reversible, donde M es un metal (La, Ce, Nd, Pr, Zr, Ti, Mg, Ca, V) o un compuesto intermetálico ( $LaNi_5$ ,  $CaNi_5$ ,  $ZrMn_2$ ,  $ZrV_2$ ,  $ZrCr_2$ ,  $TiFe$ ,  $Ti_2Ni$ ):



Han ganado atención para aplicaciones de celdas de combustible, la capacidad gravimétrica varía entre 1-3 wt%. Aun así, sus propiedades no son del todo favorables, diferentes estudios han concluido que para mejorar las propiedades se debe buscar cambiar el tamaño de partícula, porosidad y conductividad térmica (Desai, 2023).

En el apéndice F muestra las propiedades de diferentes hidruros intermetálicos.

En la siguiente tabla se compara según ventajas y desventajas las diferentes clases de hidruros metálicos.

**Tabla 2**

*Ventajas y desventajas de los hidruros intermetálicos*

<b>Aleación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b><math>AB_5</math></b>	Fácil almacenamiento de hidrógeno y mayor resistencia a impurezas.	Baja capacidad gravimétrica.
<b><math>AB_2</math></b>	Metales no magnéticos y compuestos intermetálicos simples.	Alto costo debido a que son metales raros.
<b><math>A_2B</math></b>	Estructura y propiedades magnéticas deseables.	Manejan altas temperatura y presión de operación.
<b><math>AB</math></b>	Baja masa molar y buena reversibilidad.	Relativa baja capacidad de almacenamiento.
<b><math>AB_3</math></b>	Bueno para aplicaciones electroquímicas.	Baja estabilidad y capacidad de almacenamiento.

**Nota.** Adaptado de Desai et al., (2023).

## 2.5 Propiedades de almacenamiento

### 2.5.1 Capacidad gravimétrica

Es el cociente máximo entre la masa de hidrógeno absorbido y la masa del hidruro metálico, maneja unidades de porcentaje de peso (wt%). De una forma práctica es la medida de masa de hidrógeno que puede ser liberado del hidruro metálico (Hirscher, 2007).

### 2.5.2 Capacidad volumétrica

Es la cantidad de hidrógeno almacenado por unidad de volumen del material utilizando unidades:  $\frac{kg}{m^3}$  y  $\frac{mol}{m^3}$  (Hirscher, 2007).

### 2.5.3 Reversibilidad

Durante el proceso de absorción/desorción la cantidad de hidrógeno absorbido y liberado es diferente. Este parámetro es inferior o igual a la máxima capacidad de almacenamiento del material. A medida que son cargados y descargados con hidrógeno el material va perdiendo su capacidad reversible (Broom, 2011).

**2.5.3.1 Densidad energética volumétrica.** Expresa la cantidad de energía que puede ser almacenada por unidad de volumen en el hidruro metálico, es especificada a través de la siguiente ecuación:

$$v_{ed} = \frac{m_{H_2} * LHV}{V_{MH}} [kWh/dm^3]$$

Donde  $m_{H_2}$  es la cantidad máxima de masa de hidrógeno absorbida,  $LHV$  es el poder calorífico mínimo del hidrógeno y  $V_{MH}$  es el volumen del hidruro (Grimmer, 2023).

## 2.6 Propiedades de operación

### 2.6.1 Ciclo de estabilidad

Es la habilidad del material de retener su capacidad de almacenamiento reversible, pierde su habilidad por diferentes causas como lo son el efecto de impurezas en el gas de hidrógeno, descomposición parcial del hidruro metálico. Sencillamente también se puede llamar como el número de cargas y descargas que soporta el hidruro metálico (Broom, 2011).

### ***2.6.2 Presión/temperatura de operación***

Este parámetro especifica la presión y la temperatura en que ocurren los procesos de absorción/desorción (Grimmer, 2023).

### ***2.6.3 Rango de Carga***

Es definido como la cantidad de hidrógeno que puede ser almacenado por 1 minuto (Drawer, 2023).

## **2.7 Propiedades termodinámicas**

### ***2.7.1 Cinética de absorción/desorción***

Este parámetro define que tan rápido puede ser el hidrógeno almacenado y liberado. Así determina que tan rápido el tanque de almacenamiento puede ser llenado o vaciado. La cinética es dependiente de la temperatura (Hirscher, 2007).

El comportamiento es isotérmico y se debe tener en cuenta la pendiente de la presión absorción/desorción la cual entre más inclinación tenga menor eficiencia tendrá el proceso cinético (Kim Kj, 1998).

### ***2.7.2 Energía de activación***

Conocida también como energía de umbral es la energía que tiene que ser provista a los átomos y moléculas para iniciar la reacción química. En el caso de los hidruros metálicos la energía de activación se mide como energía de hidrogenación y energía de deshidrogenación que corresponden a la ocurrencia de los procesos de absorción y desorción. Se puede obtener este parámetro mediante el método isotérmico que mide el rango que incrementa la temperatura durante la hidrogenación y deshidrogenación en condiciones isobáricas (Rathi, 2024).

Cuando se consigue la activación ocurren diferentes fenómenos termodinámicos, por ejemplo, la entalpia de absorción que mide la intensidad energética entre el átomo y la superficie (Broom, 2011).

### **2.7.3 Histéresis**

El fenómeno por el cual los procesos de absorción y desorción en los hidruros metálicos no se producen a una misma presión o temperatura. El rango de histéresis reducido favorece a la predictibilidad del comportamiento (Kim Kj, 1998).

## **3. Artículos de investigación**

### **3.1 Tanque cilíndrico de hidruro $La_{0.9}Ce_{0.1}Ni_5$ a diferentes condiciones de operación.**

Según Elkhatib and Louahlia-Gualous, (2023), en el artículo ‘‘Tanque cilíndrico de hidruro metálico para almacenamiento de energía de hidrógeno: Investigación experimental con implementación de un modelo computacional’’, en la fase experimental se investiga el comportamiento térmico del tanque fabricado con el hidruro metálico  $La_{0.9}Ce_{0.1}Ni_5$ . El proceso de absorción/desorción (circuitos de calor/frío) fue investigado en diferentes condiciones de operación con el propósito de medir el rendimiento. Diferentes presiones de hidrógeno fueron analizadas para definir el efecto de esta variable en el tiempo de carga, temperatura de operación, flujo de calor.

El modelo computacional fue desarrollado y verificado con base el experimento y resultados previos. Fue útil para predecir los parámetros clave del hidruro metálico e ilustrar el

efecto en el flujo masico del hidrógeno, temperatura local, flujo de calor, tasa de reacción del hidrógeno, etc.

En el siguiente apéndice G se observa la temperatura superficial a diferente altura para un proceso de carga a 7 bar. Se observa que en la parte inferior la temperatura es mayor en comparación a la parte superior ya que en la parte superior inicia el proceso de absorción.

En el estudio del impacto de la presión de entrada en la absorción de hidrógeno se obtiene el resultado que a mayor presión de entrada se favorece la velocidad en que incrementa la temperatura en el hidruro metálico.

En el experimento en el impacto de la temperatura del agua, consiste que durante la descarga se enfoca en la variación de la temperatura es  $10^{\circ}\text{C}$  -  $40^{\circ}\text{C}$ . El resultado es que la cantidad de hidrógeno liberado es proporcional a la temperatura del agua.

El comportamiento del impacto de la temperatura del agua durante el proceso de absorción los resultados muestran que cuanto más baja es la temperatura de enfriamiento, más rápido es absorbido el hidrógeno. Para una temperatura de enfriamiento de entrada de  $5^{\circ}\text{C}$ , el estado de carga del hidruro metálico fue del 100% después de 2 horas, mientras que, para una temperatura de enfriamiento de  $30^{\circ}\text{C}$ , solo se alcanzó el 62%.

### **3.2 Hidruro metálico como bomba de calor**

Según Gruen, (2023), en el artículo “ Hidruro metálico como bomba de calor” la bomba de calor funciona mediante un ciclo termodinámico que involucra reacciones de cambios de fase de hidrógeno entre dos hidruros metálicos que compone un sistema de 4 tanques con presiones

variables. Se considera el efecto de la histéresis, cinética y variación de las presiones determinante para la eficiencia de la bomba de calor.

En el artículo “investigación experimental sobre las características de refrigeración de una bomba de calor fabricada con hidruros metálicos en bombas de calor” Jiu-Jian & Liu, (2007), realiza la experimentación de ciclos de refrigeración, la menor temperatura de refrigeración disponible, el coeficiente de rendimiento y el poder de refrigeración de salida bajo 3 diferentes temperaturas de operación  $T_h/T_m/T_l = 115^\circ\text{C}/(30 - 32)^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ ,  $T_h/T_m/T_l = 130^\circ\text{C}/(32 - 35)^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ ,  $T_h/T_m/T_l = 150^\circ\text{C}/(30 - 32)^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$  obteniendo como resultado las “temperaturas de refrigeración más bajas” 6.5 °C, 2.5 °C, 1.9 °C respectivamente. Fue seleccionado el siguiente par de hidruros metálicos:  $\text{LaNi}_{4.61}\text{Mn}_{0.26}\text{Al}_{0.13}$  como hidruro de alta presión y  $\text{La}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Ni}_{4.8}\text{Mn}_{0.2}$  como hidruro de baja presión.

### 3.3 Hidruros metálicos en aplicaciones navales

Según Fiori, (2015), en el artículo “ Hidruros para aplicaciones submarinas; descripción general de aleaciones óptimas para la maximización de la propulsión independiente del aire “ con el propósito de incrementar la capacidad de almacenamiento y autonomía del submarino, el presente artículo propone una solución que no necesita cambiar nada del sistema de propulsión, sistemas auxiliares, fuente de energía de las celdas de combustible, sistemas de absorción y desorción de hidrógeno. Es decir, toma como limitantes propiedades del hidruro metálico como la densidad volumétrica, la presión/temperatura de operación y los ciclos de carga y descarga.

En el apéndice H se ve la comparación del porcentaje de capacidad volumétrica entre hidruros intermetálicos típicamente usados como el  $\text{LaNi}_5$  y el  $\text{TiFe}$  e hidruros de solución sólida

como el  $V_{0.6}Ti_{0.15}Cr_{0.25}$  y el  $Ti_{0.6}Zr_{0.4}Mn_{1.5}Cu_{0.3}Si_{0.2}$ . El artículo concluye con el mejoramiento en la autonomía desde 10% hasta un 60% en la autonomía del submarino si se utiliza hidruros de solución sólida en vez de hidruros intermetálicos para el almacenamiento del hidrógeno.

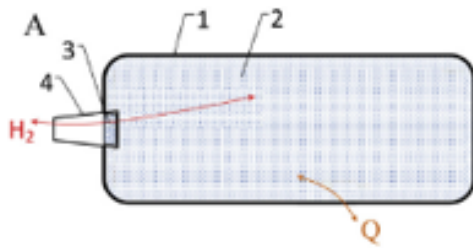
### **3.4 Hidruros metálicos con celda de combustible PEM a baja temperatura ( $T \leq 100^{\circ}\text{C}$ )**

Según Lototsky, (2015), en el artículo ‘ ‘ Hidruros metálicos para almacenamiento de hidrógeno y alimentación de celdas de poder a baja temperatura ‘ ‘ los hidruros metálicos son capaces de suministrar de forma suficiente y estable con hidrógeno a celdas PEM debido a múltiples avances ingenieriles como la deshidrogenación endotérmica por la cual se controla la liberación del hidrógeno, los mecanismos de enfriamiento por aire o líquido optimizan el suministro de hidrógeno ya que regulan el calor, además, tiene un diseño de cama que busca la optimización de transferencia de calor entre la cama de hidruro metálico para asegurar la eficiencia de desorción de hidrógeno. A través de un sistema híbrido de hidruros metálicos con cilindros de gas de hidrógeno comprimido a alta presión se logra mejorar la capacidad de almacenamiento y el flujo de combustible a la celda.

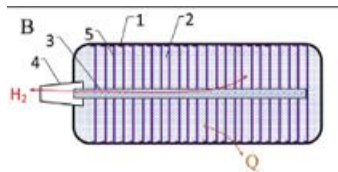
A continuación, se explican de forma comparativa los diferentes diseños de tanques de hidruro metálico usados con celda de poder PEM a baja temperatura.

**Tabla 3**

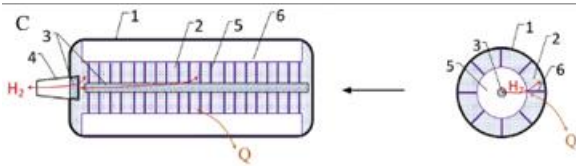
*Diseños de tanques de hidruros metálicos usados con celdas PEM*



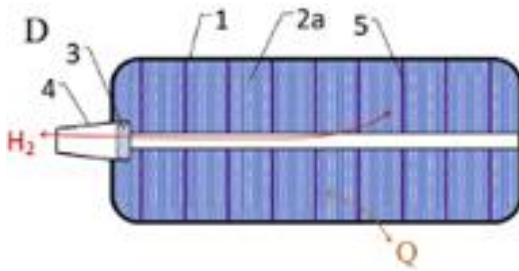
**Diseño A.** Tanque de MH (1) que almacena polvo de MH (2). El filtro de hidrógeno (3) con el conector de gas para facilitar el flujo de hidrógeno puro (4). La transferencia de calor en la cama puede ser mejorada con aletas de cobre o aluminio (5).



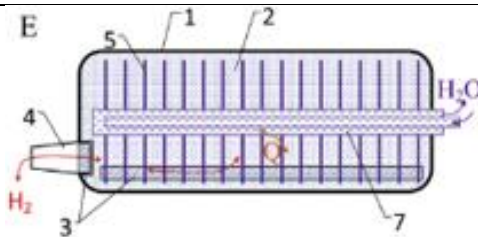
**Diseño B.** La transferencia de calor en la cama puede ser mejorada con aletas de cobre o aluminio 2,5 mm de distancia (5).



**Diseño C.** El diámetro es más grande. El filtro tubular longitudinal auxiliar (6) a lo largo del tanque para una distribución uniforme del gas. El filtro de gas (3) es el del diseño A con un pequeño espacio entre el filtro longitudinal de gas. Las aletas (5) tienen 5 mm de distancia.



**Diseño D.** Introduce compuestos de MH+TEG (Grafito expandido térmicamente) con las aletas de aluminio para mejorar la transferencia de calor en el lecho. Incluye un agujero axial para una distribución uniforme de gas.



**Diseño E.** Se basa en la circulación de agua para enfriamiento lo que contribuye a la eficiencia del intercambio de calor. Incorpora un intercambiador de calor interno similar a los usados en compresores de hidrógeno.

*Nota: Adaptado de Lototsky et al., (2015).*

Estos sistemas tienen capacidades de almacenamiento de hidrógeno que van desde 10  $NL/min$  hasta aproximadamente 10  $Nm^3/h$  de  $H_2$ , cumpliendo con los requisitos para diversos niveles de potencia y aplicaciones. La presión de equilibrio es a 10 *bar*. La dinámica de suministro se ve afectada por el tamaño del contenedor y las condiciones de transferencia de calor por esa razón se usa las aletas de cobre o aluminio. Combinar contenedores de MH con enfriamiento/calentamiento líquido con cilindros de gas hidrógeno comprimido puede mejorar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno, reducir la presión de carga y optimizar el suministro de hidrógeno para pilas de celdas de combustible.

El artículo expone que ralentizar o controlar la dinámica de suministro de hidrógeno en el sistema alimentado energéticamente por celda PEM incrementa su estabilidad, rendimiento, prevención de sobrecargas y seguridad.

### **3.5 Integración térmica en celda PEM con hidruro metálico**

En el artículo “ Integración térmica de unidad de almacenamiento de hidruro metálico y una celda de combustible PEM” (Førde et al ., 2009). El hidruro metálico y el PEM están térmicamente integrados mediante una circulación de agua común. La eficiencia energética es incrementada con la transferencia del calor en exceso producido por la celda PEM a través del agua hacia la unidad de almacenamiento para garantizar que la reacción de desorción del hidrógeno ocurra efectivamente. El hidruro metálico usado fue el  $LaNi_5$  y la unidad de almacenamiento cuenta con capacidad de almacenamiento de  $2.9 Nm^3$  con densidad de almacenamiento de 1.5 wt% y un volumen de 5,7 L, de esta manera se puede alimentar la celda de voltaje PEM durante 3 horas de forma ininterrumpida, la celda requiere presión de operación mínima de 1.2 bar y una temperatura de operación máxima de 60 °C que no puede decrecer más de 5 °C.

El siguiente apéndice I muestra la exitosa integración con el ciclo de agua en común con 3 válvulas que controlan la cantidad de agua, oxígeno e hidrógeno en el sistema con el propósito de regular la temperatura de tal forma que siempre sea mayor a 25 °C para garantizar un proceso de desorción adecuado en un sistema estable. Fue necesario diseñar una “estrategia de control” para coordinar y controlar los diferentes componentes del sistema garantizando un comportamiento optimo estable y eficiente.

En el apéndice J se observa el proceso de desorción a diferentes temperaturas y presión. Se observa la importancia que la temperatura sea mayor a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una presión de operación de  $2\text{ bar}$  ya que a una temperatura inferior no se libera la correcta cantidad de hidrógeno.

### **3.6 Sistema híbrido en equipos de montacarga de 3 toneladas de capacidad.**

En el artículo ‘‘Hidruros metálicos: almacenamiento y suministro de un montacarga con celda PEM de baja temperatura’’ (Lototsky et al., 2016). Los equipos de montacargas equipados con sistemas de hidrógeno utilizan el gas comprimido en cilindros de  $74\text{ L}$  (CGH2) con presiones de hasta  $350\text{ bar}$  que alimentan una celda de poder consiguiendo  $10\text{ kW}$  y requieren  $20\text{ Nm}^3/\text{h}$  de combustible ( $1.79\text{ kg}$ ).

El diseño de un sistema híbrido que consiste en un tanque CGH2 y un tanque de hidruro metálico. Los container conectados a un mismo suministro de gas y un circuito de agua frío/caliente integrado con una celda PEM. Mediante el uso de hidruros metálicos se busca mejorar el tiempo de recarga, vida útil, capacidad almacenamiento, disminuir costos, facilitar el reabastecimiento y disminuir riesgos de seguridad.

El tanque de hidruro metálico  $95\text{ cm} \times 120\text{ cm} \times 70\text{ cm}$  con un peso de  $200\text{ kg}$ , con 20 tubos ( $\varnothing 51.8\text{ cm} \times 64\text{ cm}$ ) organizados en disposición paralela sumergidos en una cuna de agua que provee control térmico. Es fabricado con el hidruro intermetálico tipo  $AB_5\text{ MmNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$  caracterizado con una presión de equilibrio a  $10\text{ bar}$ . El tanque y la celda de poder están térmicamente integrados usando el calor del ambiente y el calor de la celda de poder y así compensar el efecto endotérmico de la desorción del hidrógeno.

El tanque de hidruro metálico está diseñado para proveer  $12 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de hidrógeno de forma continua, asegurando así una eficiencia confiable del sistema y el hidrógeno almacenado en hidruros metálicos como una solución.

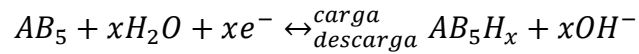
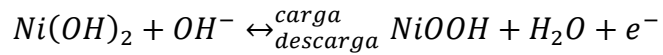
Por otra parte, en el apéndice K el tanque CGH2 es de vital importancia para optimizar el sistema ya que ayuda a absorber el exceso de calor durante el proceso exotérmico, amortigua la recuperación térmica del tanque MH cuando el consumo de la celda decrece, favorece al proceso de carga ya que almacena el gas que cuando se enfría será absorbido por el hidruro metálico.

### **3.7 Hidruros metálicos en baterías de níquel**

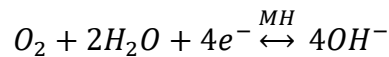
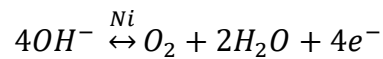
La capacidad de almacenamiento de una batería NiMH depende de la eficiencia para absorber/liberar hidrógeno por parte del hidruro metálico.

Una batería NiMH opera mediante reacciones electroquímicas entre los electrodos de níquel y el hidruro metálico que permiten el almacenamiento y liberación de energía, el electrodo alcalino facilita la conducción de iones y el flujo de corriente eléctrica.

En el proceso de carga se almacena energía en forma de hidrógeno en el electrodo de hidruro metálico, una corriente eléctrica es ejercida en la celda producción la oxidación del hidróxido de níquel ( $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ) con liberación de electrones y el agua es reducida a átomos de hidrógenos que simultáneamente absorbe el hidruro metálico. La reacción en reversa ocurre durante el proceso de descarga que el hidroxilo de níquel se reduce y el hidrógeno es liberado del hidruro metálico junto con electrones que fluyen a través de un circuito externo de suministros energético. Ocurren las siguientes reacciones durante los procesos de carga/descarga.

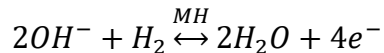
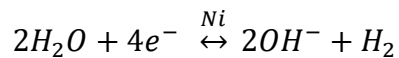


Para asegurar el buen funcionamiento de la batería ocurren unas ‘reacciones secundarias’. Durante la sobrecarga en el electrodo de níquel los iones  $OH^-$  son oxidados produciendo un aumento parcial de oxígeno. En el proceso de sobre descarga el oxígeno es transportado al hidruro metálico donde puede ser reducido en iones  $OH^-$ .



La energía suministrada a la batería durante el proceso de sobre carga es totalmente convertida en calor que dependerá del ciclo de recombinación de oxígeno.

El agua es reducida en hidróxido e hidrógeno para favorecer los procesos de carga/descarga y ayuda a controlar la presión y la temperatura de la batería, las reacciones ocurren de la siguiente manera:



En la selección del hidruro metálico se consideró que la presión del gas debía ser baja para evitar la reducción de los protones de hidrógeno en hidrógeno molecular, a esto se le conoce como reacción evolutiva del hidrógeno.

La sensibilidad a la oxidación es la habilidad que tiene la batería de mantener su capacidad de almacenamiento después de diferentes ciclos de carga y descarga. En el apéndice L se muestra el comportamiento cíclico de un electrodo fabricado con el hidruro metálico  $LaNi_5$ . Se observa que después de 400 ciclos ha disminuido un 90% la capacidad inicial de almacenamiento y que calculando el factor de estabilidad ( $\frac{\text{Capacidad inicial}}{\text{capacidad final}}$ ) el factor de estabilidad es del 12%.

En el apéndice M el ciclo de vida para diferentes aleaciones  $AB_x$  con la misma cantidad de cobre, se puede observar el diferente comportamiento de la capacidad final de carga a diferente cantidad de ciclos aplicados.

En el apéndice N se observa la microscopia electrónica de barrido del hidruro metálico  $LaNi_5$  que se puede observar el proceso de degradación atribuido a la oxidación del hidruro metálico. Debido al proceso de absorción de hidrógeno el hidruro sufre una expansión volumétrica cristalina del 25%. Después de 350 casi todo el material se ha vuelto inactivo reduciendo la capacidad electroquímica de la batería.

Reemplazando algunos átomos de níquel y lantánido por otros elementos como aluminio, silicio y cobalto se obtienen compuestos multicomponentes mejoran el factor de estabilidad del 12% al 60% del hidruro metálico  $LaNi_5$ . En el siguiente apéndice () se puede observar la micrografía de barrido electrónico de  $LaNi_4Cu$  y  $LaNi_{4,4}Cu$  después de 750 ciclos de carga y descarga.

En el artículo, "Materiales de almacenamiento de hidrogeno: caracterización de propiedades de almacenamiento", Broom (2011), describe las soluciones solidas como

prometedoras para el almacenamiento de hidrogeno respecto a los intermetálicos considerando sus limitaciones como mayor presión y temperatura de operación requerida además de que es una tecnología de alto costo.

#### **4. Discusión**

##### **4.1 Optimización operativa de una celda de combustible mediante el control térmico del hidruro metálico.**

El control térmico es crucial para conseguir eficiencia y sostenibilidad en la celda de combustible alimentada por un hidruro metálico, considerando los resultados del tanque a diferentes condiciones de operación para controlar idóneamente la temperatura del agua durante el proceso de absorción del hidrógeno optimiza el tiempo de carga de una celda de combustible, además, es importante la refrigeración y así evitar sobrecalentamiento durante el proceso de absorción que podría reducir su vida útil. Durante el proceso de descarga que ocurre la reacción endotérmica de desorción es vital mantener la temperatura del agua y así conseguir que la celda de combustible reciba de forma constante el suministro de hidrógeno requerido.

Considerando la previa investigación y discusión, según mi análisis, el proceso óptimo de absorción en un hidruro metálico debe incluir un control preciso del enfriamiento del tanque durante la liberación energética del proceso exotérmica de absorción, junto con un control de la presión interna. Este diseño favorece la tasa de carga sin comprometer la vida útil del material. Es fundamental diseñar el mecanismo de disipación de calor mediante la refrigeración por agua con realimentación del agua para mantener la temperatura idónea de refrigeración y recirculación del agua para minimizar el impacto ambiental.

#### **4.2 Coeficiente de eficiencia de una bomba de calor fabricada por un par de hidruros metálicos.**

Las bombas de calor son fabricadas con clorofluorocarbonos (CFC) los cuales son altamente nocivos para el medio ambiente, por lo tanto, conseguir reemplazarlos con hidruros metálicos es una alternativa amigable con el medio ambiente.

En el análisis del hidruro metálico como bomba de calor la temperatura de funcionamiento ( $T_h$ ) no solo influyen en la potencia de refrigeración, también en la variación de las presiones de los tanques ya que influye en la capacidad de absorción y desorción. Además, la variación de la presión tiene un rol vital en la eficiencia de una bomba de calor ya que produce un flujo de hidrógeno desde la cama de alta presión a la cama de baja presión acelerando la desorción en la cama de alta presión y la absorción en la cama de baja presión. La minimización de la histéresis aumenta la estabilización y el coeficiente de eficiencia ya que reduce los rangos de temperatura y presión de operación consiguiendo mayor fiabilidad en el comportamiento de la bomba de calor.

Considerando la previa investigación y discusión, según mi análisis, a medida que aumenta la temperatura de operación, también aumenta junto la presión de los tanques de reacción de alta presión. Por lo tanto, al generar un aumento diferencial de presiones mejora la tasa de transferencia de masa de hidrógeno lo que contribuye a una mejor eficiencia.

#### **4.3 Optimización de la autonomía de un submarino**

En el análisis de hidruro metálico para aplicaciones navales toman como partida los hidruros metálicos  $LaNi_5$  y  $TiFe$  que son de los hidruros metálicos mas comerciales, al tener en cuenta sus limitantes en la histéresis y en la cinética se analiza el uso de aleaciones de más de 3

átomos en hidruros metálicos o también llamados compuestos multicomponentes, de tal manera que se puede optimizar el sistema de propulsión de un submarino modificando el material por el que es fabricado este mismo, es decir que con ingeniería en la selección de materiales se puede optimizar sin necesidad de profundizar en el comportamiento mecánico en cuestión.

Se destaca la importancia de las propiedades clave de los hidruros metálicos como la densidad volumétrica, presión/temperatura de operación y ciclos de carga/descarga como parámetros clave de la autonomía del sistema en cuestión.

Considerando la previa investigación y discusión, según mi análisis, cualquiera de los compuestos sólidos es apto para reemplazar los sistemas de propulsión fabricados por  $LaNi_5$  y  $TiFe$ . El futuro de esta investigación con el objetivo de seleccionar el compuesto sólido óptimo para el sistema de propulsión es medir experimentalmente las condiciones de operación de cada uno y la estabilidad en ciclos de carga.

#### **4.4 Hidruros metálicos e hidrógeno de gas comprimido para alimentar sistemas con celdas de combustible PEM**

En el análisis de hidruro metálico con celda de combustible se analiza que los sistemas de MH ofrecen soluciones eficientes de almacenamiento de hidrógeno para aplicaciones de celdas de combustible PEM de baja temperatura, garantizando una operación energética estable desde unos pocos vatios hasta varios kilovatios.

Un sistema combinado es útil en la gestión de la dinámica de combustible y además mitiga eficientemente la inhibición de suministro de hidrógeno que ocurre cuando no todo el hidrógeno es consumido por la celda de combustible PEM.

Controlar la dinámica de suministro aumenta la estabilidad del sistema ya que se evita una entrega excesiva del gas a la celda de combustible lo que contribuye a un rendimiento más eficiente y al prevenir sobrecargas que podrían causar daños en el sistema, afectar la vida útil y representar un riesgo para la seguridad.

Considerando la previa investigación y discusión, según mi análisis, se utilizan aletas de cobre como mecanismo de transferencia de calor para evitar sobrecalentamiento en el hidruro metálico durante el proceso de absorción, cumpliendo con el requisito para el óptimo proceso de absorción planteado en lo discutido en optimización operativa de una celda de combustible.

#### **4.5 Regulación térmica de celda de combustible PEM alimentada por hidruro metálico**

En el análisis de integración térmica en celda PEM integran los dos sistemas mediante un circuito de agua en común el exceso de calor producido en la celda de combustible puede ser transferido al hidruro metálicos y así garantizar la eficiencia en el proceso de desorción, aumentando la eficiencia energética de todo el sistema.

El uso de la triple válvula que regula el agua que entra el hidruro metálico ayuda a controlar con precisión el calor transferido entre los componentes. El propósito es que la celda de combustible alcance la temperatura de operación lo más rápido posible y el hidruro metálico permanezca estable sobre los 25 °C con una presión de 2 bar.

Considerando la previa investigación y discusión, el mecanismo de transferencia de calor se diseñó para mejorar el proceso de desorción. El objetivo es contribuir a la eficiencia energética del sistema sin comprometer el proceso de desorción del hidruro intermetálico  $AB_5$ . En el futuro se contempla reemplazar el hidruro intermetálico por un compuesto sólido multicomponente como

ya se ha discutido previamente en “11.3” y se profundiza en “11.7”. Para una correcta implementación se debe analizar la presión y temperatura para una óptima desorción como se hizo en el artículo referenciado en “10.5”.

### **4.6 Integración de sistemas híbridos de almacenamiento de hidrógeno para eficiencia y sostenibilidad en equipos de montacargas**

En sistema híbrido de equipo de montacarga el sistema híbrido consigue una mayor flexibilidad en el suministro con una gestión más eficiente de la energía que conlleva una optimización de los ciclos de carga y descarga y por supuesto una reducción de la huella de carbono y mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero.

Al aprovechar las fuentes de calor disponibles como el calor residual de la celda de combustible para facilitar la desorción del hidrógeno no solo incrementa la eficiencia energética también reduce costos operativos.

Se puede decir que, con el propósito de maximizar la capacidad de almacenamiento, reducir aún más los tiempos de cargas, mejorar la gestión térmica y aumentar la competitividad en el mercado en un futuro se profundizará en la optimización de la integración con el desarrollo de nuevos materiales de almacenamiento.

### **4.7 Influencia de elementos multicomponentes en la estabilidad de baterías níquel-metal hidruro**

En hidruros metálicos de batería de níquel la capacidad de almacenamiento se basa en la capacidad del electrodo en absorber y liberar hidrógeno de forma eficiente y así se proporciona mayor densidad energética en comparación a baterías tradicionales como la de níquel-cadmio.

La incorporación de los elementos multicomponentes es crucial tanto en la estabilidad como en las reacciones secundarias que afecta el rendimiento electroquímico. El objetivo es cambiar la estructura cristalina del material y así mejorar la estabilidad, reducir la expansión volumétrica y aumentar la densidad energética.

Al tener la capacidad de incrementar el factor de estabilidad del 12% al 60% se puede discutir el efecto significativo en la integridad estructural de la batería lo cual se refleja en mayor durabilidad y eficiencia del sistema de almacenamiento energético.

Las reacciones secundarias pueden afectar el rendimiento y la durabilidad de forma negativa o positiva. La batería perderá cierta capacidad de carga al estar en condiciones de circuito abierto en el cual la reacción de autocarga juega un papel vital, aunque podría llegar a convertirse en un problema de degradación del hidruro metálico por exceso de autodescarga debido al aumento de la presión.

La reacción de sobrecarga y sobre descarga ayuda a la conductividad en el electrodo, a la eficiencia electroquímica y autonomía. Aunque, al realizarlo de una forma desproporcionada podría convertirse en un problema de degradación del hidruro metálico.

Los elementos multicomponentes resultan ser más útiles de lo que ya se había propuesto debido a aumenta la resistencia del hidruro metálico a ser fracturar por posibles excesos de presiones gaseosa de hidrógeno y oxígeno producido por las reacciones secundarias.

Es de discusión que una estrategia avanzada de ingeniería en diseño es fundamental en el desarrollo de baterías con competente rendimiento y durabilidad en diferentes sectores tecnológicos en almacenamiento de energía con presiones y temperaturas operativas no constantes.

El comportamiento de estabilidad electroquímica de  $LaNi_5$  es decepcionante ya que se pierde el 90% después de 400 ciclos, se puede comparar el tamaño de partícula al inicio y después de 400 ciclos. Se observa la reducción del tamaño de partícula debido a la transformación alfa-beta durante los ciclos, la cantidad de esfuerzo al momento de expandirse y contraerse fracturan el material.

Después de profundizar en la mejora de las propiedades de almacenamiento de hidrógeno por hidruros metálicos multicomponentes como la resistencia a la degradación, ciclos de carga/descarga y capacidad de almacenamiento en comparación con los compuestos intermetálicos se debe optar por reemplazar el uso de compuestos intermetálicos por este material en las baterías tipo NiMH.

Una de las desventajas de las soluciones solidas es el factor económico ya que presentan un alto costo en comparación con los intermetálicos, por lo tanto, el futuro de esta investigación debería ser reducir esta desventaja.

### **Conclusiones**

La gestión precisa de temperatura y presión en el proceso de absorción es crucial para maximizar la eficiencia y la vida útil de un hidruro metálico. Es indispensable un diseño óptimo de disipación de calor para conseguir condiciones de operaciones optimas y minimizar el impacto ambiental.

La introducción de elementos adicionales en la estructura cristalina mejora la estabilidad, reduce la expansión volumétrica relacionada con la absorción que eventualmente produce degradación lo que contribuye a una mayor vida útil del hidruro metálico.

El sistema combinado de hidruros metálicos con gas cilindros metálicos de gas de hidrógeno comprimido que alimenta a una celda PEM alimentado almacena el hidrógeno no consumido por la celda mitigando el efecto de inhibición. La implementación estratégica de regulación térmica de una celda PEM alimentada por un hidruro intermetálico mediante la triple válvula propuesta en el diseño asegura una operación eficiente y estable.

Retomando a la pregunta planteada en la introducción los hidruros metálicos representan un desafío a la ingeniería en términos de propiedades específicas requeridas. Los diferentes desafíos técnicos y económicos han sido desarrollados de forma evolutiva a través de los años logrando aplicaciones sostenibles en diferentes sectores industriales. Los elementos multicomponentes resultan ser un viable reemplazo a los hidruros intermetálicos ampliamente utilizados en diferentes aplicaciones.

En conclusión, para conseguir la transición energética mundial y en el futuro de la investigación de almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos se debe profundizar en la investigación de materiales con mayor estabilidad en los ciclos de carga/descarga, mayor capacidad de almacenamiento y mejor tasa de carga.

**Referencias bibliográficas**

- Arjmandi, M., Fattahi, M., Motevassel, M., & Rezaveisi, H. (2023). Evaluating algorithms of decision tree, support vector machine and regression for anode side catalyst data in proton exchange membrane water electrolysis. *Scientific Reports*, 13(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-47174-w>
- Broom DP. Hydrogen storage materials: the characterization of their storage properties. *Green Energy Technol* 2011;27:1e17. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-221-6>.
- Bui VG, Tu Bui TM, Ong HC, Nizeti S, Bui VH, Xuan Nguyen TT, et al. Optimizing operation parameters of a spark-ignition engine fueled with biogas-hydrogen blend integrated into biomass-solar hybrid renewable energy system. *Energy* 2022;252:124052.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124052>.
- Cavo, M., Gadducci, E., Rattazzi, D., Rivarolo, M., & Magistri, L. (2021). Dynamic analysis of PEM fuel cells and metal hydrides on a zero-emission ship: A model-based approach. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 46(64), 32630-32644.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.104>
- Desai, F. J., Uddin, M. N., Rahman, M. M., & Asmatulu, R. (2023). A critical review on improving hydrogen storage properties of metal hydride via nanostructuring and integrating carbonaceous materials. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 48(75), 29256-29294. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.029>

- Drawer, C., Lange, J., & Kaltschmitt, M. (2023). Metal hydrides for hydrogen storage – Identification and evaluation of stationary and transportation applications. *Journal Of Energy Storage*, 77, 109988. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109988>
- Elkhatib, R., & Louahlia-Gualous, H. (2023). Metal hydride cylindrical tank for energy hydrogen storage: Experimental and computational modeling investigations. *Applied Thermal Engineering*, 230, 120756. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120756>
- Fiori, C., Dell’Era, A., Zuccari, F., Santiangeli, A., D’Orazio, A., & Orecchini, F. (2015). Hydrides for submarine applications: Overview and identification of optimal alloys for air independent propulsion maximization. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 40(35), 11879-11889. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.105>
- Førde, T., Eriksen, J. A., Pettersen, A., Vie, P. J. S., & Ulleberg, Ø. (2009). Thermal integration of a metal hydride storage unit and a PEM fuel cell stack. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 34(16), 6730-6739. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.146>
- Furukawa, H., Cordova, K. E., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2013). The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks. *Science*, 341(6149). <https://doi.org/10.1126/science.1230444>
- Gruen DM, Menelsohn MH, Sheft I. Metal hydride as chemical heat pump. *Sol Energy* 1978;21(2):153–6.

Hassan, I. A., Ramadan, H. S. M., Saleh, M., & Hissel, D. (2018). Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 149, 111311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>

Hydride reactors. *Int J Hydrogen Energy* 1998;23(5):355–62.

Jiu-Jian, N., & Liu, H. (2007). Experimental research on refrigeration characteristics of a metal hydride heat pump in auto air-conditioning. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 32(13), 2567-2572. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.09.038>

Kim KJ, Feldman KT, Lloyd G. et al. Performance of high power metal

Klopčič, N., Grimmer, I., Winkler, F., Sartory, M., & Trattner, A. (2023). A review on metal hydride materials for hydrogen storage. *Journal Of Energy Storage*, 72, 108456. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108456>

Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science For Energy Technologies*, 2(3), 442-454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>

Li, J., Xu, H., Zhou, K., & Li, J. (2024). A review on the research progress and application of compressed hydrogen in the marine hydrogen fuel cell power system. *Heliyon*, e25304. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25304>

Li, Z., Sun, Y., Zhang, C., Wei, S., Zhao, L., Zeng, J., Cao, Z., Zou, Y., Chu, H., Xu, F., Sun, L., & Pan, H. (2023). Optimizing hydrogen ad/desorption of MG-based hydrides for energy-storage applications. *Journal of Materials Science & Technology*, 141, 221-235. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.08.047>

- Lototsky, M., Davids, M. W., Tolj, I., Klochko, Y., Sekhar, B. S., Chidziva, S., Smith, F., Swanepoel, D., & Pollet, B. G. (2015). Metal hydride systems for hydrogen storage and supply for stationary and automotive low temperature PEM fuel cell power modules. *International Journal of Hydrogen Energy*, *40*(35), 11491–11497. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.095>
- Lototsky, M., Tolj, I., Davids, M. W., Klochko, Y., Parsons, A. W., Swanepoel, D., Ehlers, R., Louw, G., Van Der Westhuizen, B., Smith, F., Pollet, B. G., Sita, C., & Linkov, V. (2016). Metal hydride hydrogen storage and supply systems for electric forklift with low-temperature proton exchange membrane fuel cell power module. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(31), 13831–13842. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.148>
- Notten, P. P. (1995). Rechargeable nickel-metalhydride batteries: a successful new concept. In *Springer eBooks* (pp. 151–195). [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0295-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0295-7_7)
- Peschel A. Industrial perspective on hydrogen purification, compression, storage, and distribution. *Fuel Cell* 2020;20:385e93. <https://doi.org/10.1002/fuce.201900235>.
- Rathi, B., Agarwal, S., Shrivastava, K., Kumar, M., & Jain, A. (2024). Recent advances in designing metal oxide-based catalysts to enhance the sorption kinetics of magnesium hydride. *International Journal Of Hydrogen Energy*, *53*, 131-162. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.031>
- Rusman, N., & Dahari, M. (2016). A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(28), 12108-12126. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.244>

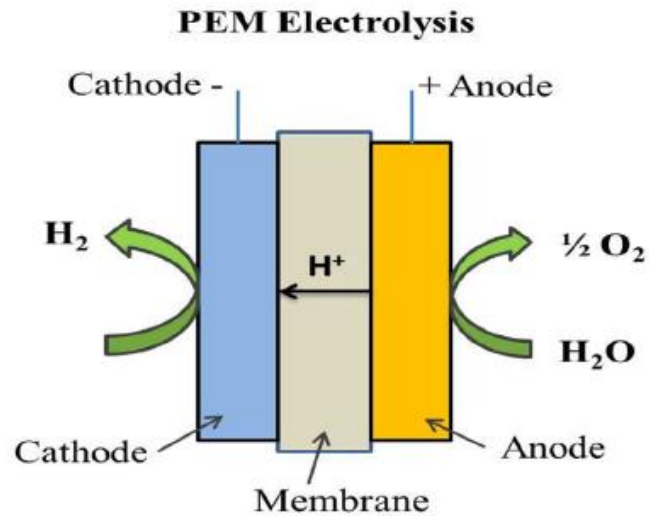
- Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., & Hirscher, M. (2007). Metal hydride Materials for solid hydrogen Storage: A review☆. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(9), 1121-1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>
- Schlesinger, H. I., & Brown, H. C. (1940). Metallo borohydrides. III. Lithium borohydride. *Journal Of The American Chemical Society*, 62(12), 3429-3435. <https://doi.org/10.1021/ja01869a039>
- Song H, Liu Y, Bian H, Shen M, Lin X. Energy, environment, and economic analyses on a novel hydrogen production method by electrified steam methane reforming with renewable energy accommodation. *Energy Convers Manag* 2022; 258:115513. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115513>.
- Thanh Tuan Le, Prabhakar Sharma, Bhaskor Jyoti Bora, Viet Dung Tran, Thanh Hai Truong, Huu Cuong Le, Phuoc Quy Phong Nguyen. (2023) Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges. *elsevier*.
- Ustolin F, Lamb JJ, Burheim OS, Pollet BG. Energy and safety of hydrogen storage. In: *Hydrogen Biomass Bioenergy*. Elsevier; 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102629-8.00008-6>.
- Wu, Z., Yang, F., Bao, Z., Nyamsi, S. N., & Zhang, Z. (2013). Improvement in hydrogen storage characteristics of Mg-based metal hydrides by doping nonmetals with high electronegativity: A first-principle study. *Computational Materials Science*, 78, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.05.018>

Zhang T, Uratani J, Huang Y, Xu L, Griffiths S, Ding Y. Hydrogen liquefaction and storage: recent progress and perspectives. *Renew Sustain Energy Rev* 2023;176:113204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113204>

Zhou, D., Sun, H., Guo, S., Zhao, D., Li, C. M., & Zhang, Y. (2022). Hydrogen storage properties of Mg-based alloys modified with metal-organic frameworks and carbon-based porous materials: A review and summary. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 57, 1373-1388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.127>

**Apéndice A.**

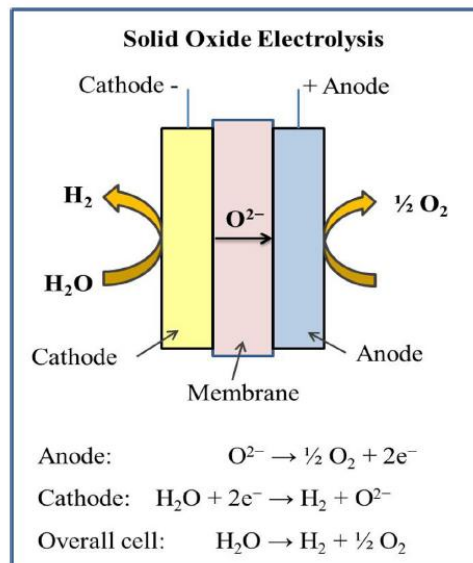
*Esquema de celda electrolítica PEM (Arimandi et al. 2023).*



**Apéndice**

**B.**

*Esquema de electrolisis de oxido solido (Kumar & Himabindu, 2019)*



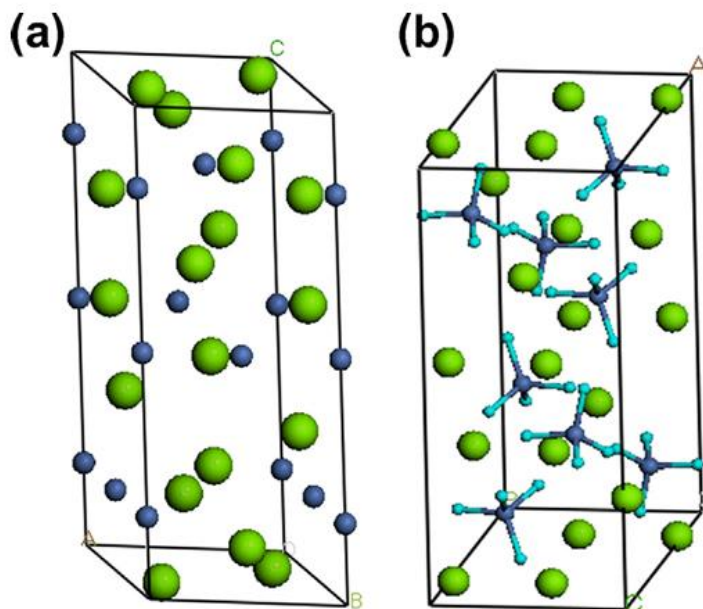
**Apéndice C.**

*Diferentes tipos de celda de combustible y sus parámetros clave (Li et al., 2024).*

Type		AFC	PEMFC	HT-PEMFC	PAFC	DMFC	MCFC	SOFC
Electrodes	Anode	Pt/Ag	Pt/C	Pt/C	Pt/C	Pt/C	Li/NiO	Sr/LaMnO <sub>2</sub>
	Cathode	Pt/Ni	Pt/C	Pt/C	Pt/C	Pt-Ru/C	Ni/Al,Ni/Cr	Ni/YSZ
Electrolytes		Potassium hydroxide	Aqueous polymer films	Inorganic acid-based polymer films	Phosphoric acid	Aqueous polymer films	Fused carbonates	Porous ceramic materials
Fuels		H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , LNG, Methanol	Methanol	H <sub>2</sub> , methanol, hydrocarbons	H <sub>2</sub> , methanol, hydrocarbons
Operating temperature/°C		60~200	65~85	160~220	140~200	75~120	650~700	500~1000
Power Capacity/KW		≤ 500	≤ 120		100~400	≤ 5	120~10,000	≤ 10 <sup>7</sup>
Electrical efficiency/%		50~60	50~60	50~60	40~55	20~30	50~55	50~60
Price		Low	Low	Medium	Medium	Medium	High	High
Lifespan		Medium	Medium	Medium	Good	Medium	Good	Medium
Size		Small	Small	Small	Large	Small	Large	Medium

**Apéndice D,**

*Estructura de Mg<sub>2</sub>Ni (a) y su hidruro(b). Mg verde, Ni azul oscuro, Hidrógeno azul claro (Wu et al., 2013).*



**Apéndice E.**

*Propiedades del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos complejos (Desai,2023)*

Alloys	Hydrogen Gravimetric Density (wt%)	$P_{abs}$ (bar), $T_{abs}$ (°C)	$\Delta H$ (kJ/mol H <sub>2</sub> )	$\Delta E_a$ (kJ/mol)
LiBH <sub>4</sub>	13.5	150, -	74	156 ± 20
NaAlH <sub>4</sub>	4.9	120, 120	40.9 (step-1), 45.6 (step-2), 120 (step-3)	114.7
NaBH <sub>4</sub>	10.6	30–150, 585	75	75
Ca(AlH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	5.9–7.9	1, 200	26	161
Ca(BH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	8.7	90, 350	36 ± 4	225–280
Al(BH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	17.0	100, 150–200	131	–
Mg(AlH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	9.3	100, 110–380	41	119
Mg(BH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	14.82	1, 290–350	39.3	178 ± 14

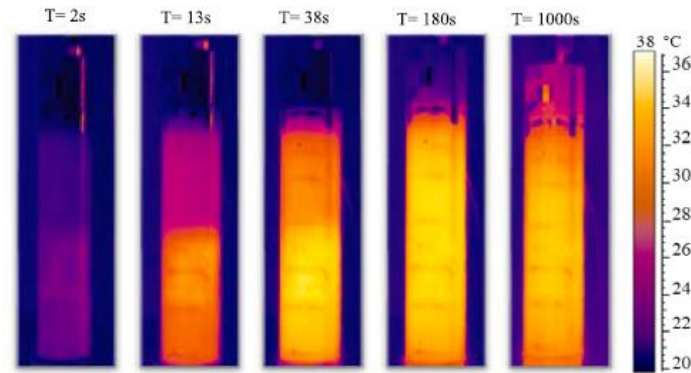
**Apéndice F.**

Propiedades de hidruros intermetálicos (Desai, 2023).

Alloy	Hydrogen Storage Capacity (wt%)	$P_{abs}$ (bar), $T_{abs}$ (°C)	$\Delta H_{abs}$ , $\Delta H_{des}$ (kJ/mol H <sub>2</sub> )
AB <sub>5</sub>			
LaNi <sub>5</sub>	1.37	10, 25	-28 ± 1, -37 ± 1
LaNi <sub>4.6</sub> Al <sub>0.4</sub>	1.3	10, 20	-34.04, 35.95
LaNi <sub>4.5</sub> Sn <sub>0.5</sub>	0.95	3, 25	36 ± 5, 40 ± 5
CeNi <sub>4</sub> Cr	3.5	20–35, 20–60	–
CeNi <sub>3</sub> Cr <sub>2</sub>	3.8	30–35, 20–60	–
CeNi <sub>3</sub> Zr <sub>2</sub>	4.3	25–35, 20–60	–
CeNi <sub>4</sub> Zr	4.0	20–35, 20–60	–
CeNi <sub>3.75</sub> Ga <sub>1.25</sub>	3.0	10, 25–75	-, -39.9 ± 0.9
AB <sub>2</sub>			
TiCr <sub>1.8</sub>	2.43	182, 25	–
TiMn <sub>1.5</sub>	1.86	8.4, 25	–
ZrMn <sub>2</sub>	1.77	10, 25	–
Ti <sub>1-x</sub> Cr <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.75</sub> Mn <sub>0.3</sub>	1.55	70, -35	-, 14
ZrFe <sub>1.8</sub> M <sub>0.2</sub>	1.8	80–290, 20	–
M = (V, Cr, Mn)			
ZrFe <sub>1.8</sub> M <sub>0.2</sub>	1.6	65–455, 20	–
M = (Fe, Co, Ni, Cu, Mo)			
A <sub>2</sub> B			
Mg <sub>2</sub> Ni	3.67	20, 300	–
Mg <sub>2</sub> Cu	0.39	50, 250	–
Ti <sub>2</sub> Ni	2.34	70, 30	–
AB			
TiFe	1.89	5, 30	–
TiNi	1.18	70, 130	–
TiFe <sub>0.8</sub> Ni <sub>0.2</sub>	1.1	50, 100	–
Pd-transition metals (Cu, Au, Pt, Ir)	0.59–0.62	100, 25	–

**Apéndice G.**

*Flujo de temperatura en tanque cilíndrico durante el proceso de absorción (Elkhatib & Louahlia-Gualous, 2023).*



**Apéndice H.**

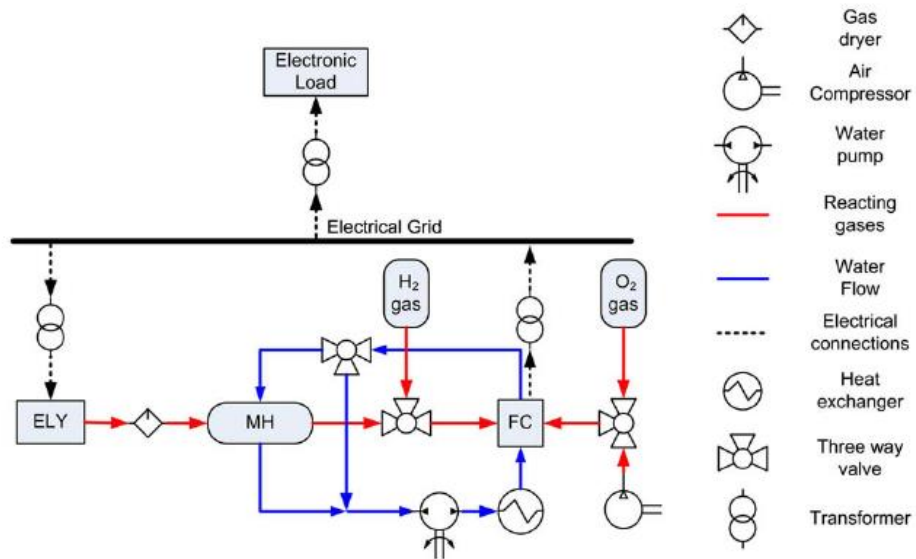
*Resultados de incremento del porcentaje de volumen (Fiori,2015).*

**Table 4 – Hydrogen storage volume % increase respect to LaNi<sub>5</sub> and TiFe alloys.**

Alloy	g/l	Vol% respect to LaNi <sub>5</sub>	Vol% respect to TiFe
LaNi <sub>5</sub>	108	0	6.35
TiFe	101	-5.97	0
Ti <sub>0.8</sub> Zr <sub>0.3</sub> Mn <sub>1.6</sub> Cr <sub>0.2</sub> Al <sub>0.1</sub>	114	5.57	12.3
Ti <sub>0.8</sub> Zr <sub>0.1</sub> MnCr <sub>0.9</sub> V <sub>0.1</sub>	117	8.57	15.47
V <sub>75</sub> TiCrAl <sub>5</sub>	128	18.85	26.41
V <sub>0.5</sub> Ti <sub>0.25</sub> Cr <sub>0.25</sub>	140	30.00	38.26
V <sub>0.6</sub> Ti <sub>0.15</sub> Cr <sub>0.25</sub>	158	46.71	56.03
Ti <sub>0.6</sub> Zr <sub>0.4</sub> Mn <sub>1.5</sub> Cu <sub>0.3</sub> Si <sub>0.2</sub>	164	51.9	61.6

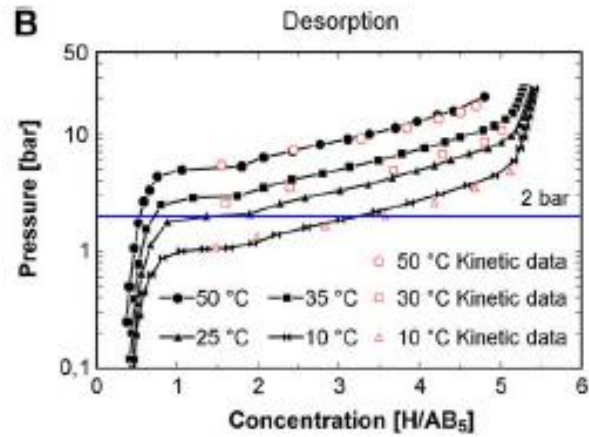
**Apéndice I.**

*Sistema de hidruro metálico con PEM celda de combustible (Førde, 2009).*



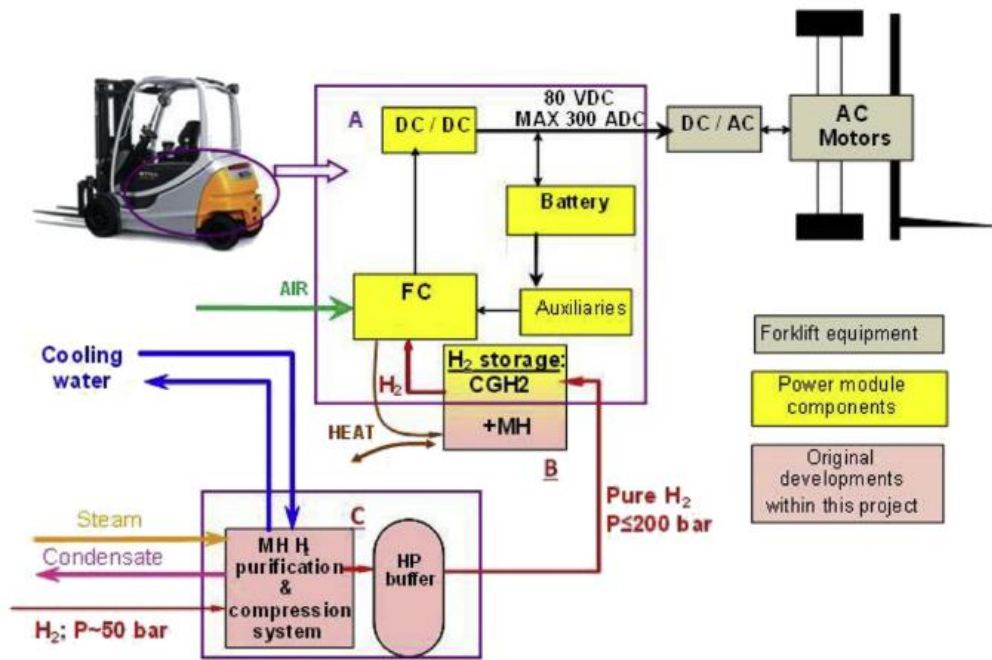
**Apéndice J.**

*Influencia de la temperatura en el proceso de desorción con presión de 2 bar (Førde, 2009).*



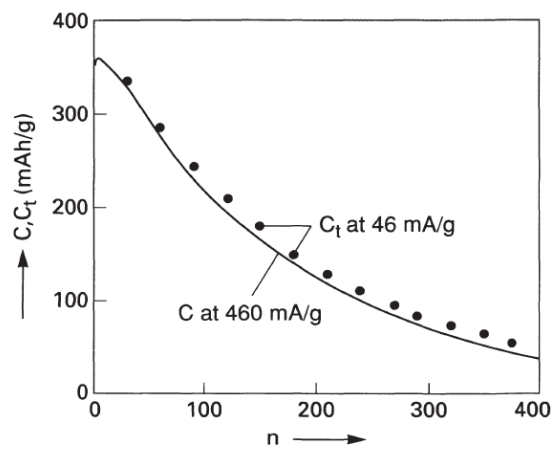
**Apéndice K.**

*Sistema híbrido de montacarga (Lototskyy, 2016).*



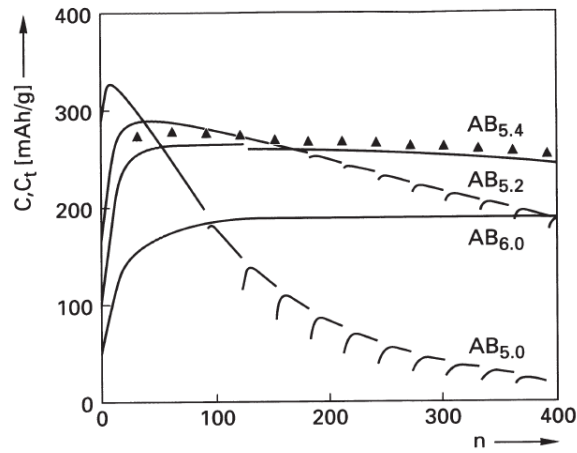
**Apéndice L.**

*Ciclo de estabilidad LaNi5 (Notten, 1995).*



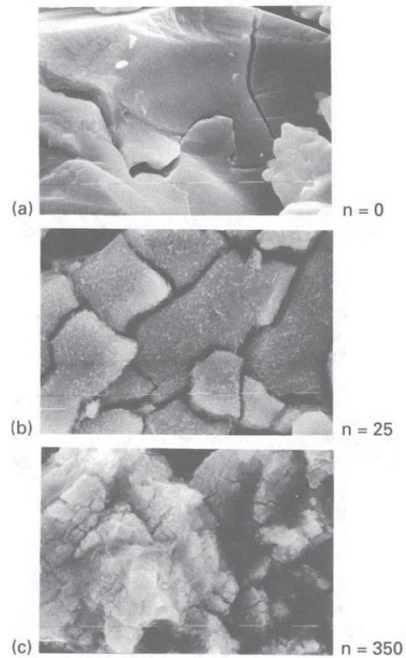
**Apéndice M.**

*Capacidad de almacenamiento final para diferentes aleaciones intermetálicas (Notten, 1995).*



**Apéndice N.**

*Microscopia electrónica de barrido LaNi<sub>5</sub> (Notten, 1995).*



**Apéndice O.**

*Micrografía hidruros Intermetálicos a 750 ciclos de carga y descarga (Notten, 1995).*

