



4.- ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.

4.1.- Introducción.

En ocasiones resulta conveniente y más eficiente para los sistemas de producción de hidrógeno almacenar el combustible de hidrógeno producido como hidrógeno en sí mismo. Esto resulta particularmente adecuado en las aplicaciones de poca potencia, en las que no se justifica el coste de los equipos necesarios para la producción del combustible. También se puede considerar una forma razonable de almacenar la energía eléctrica procedente de fuentes tales como generadores eólicos y de energía hidroeléctrica, en la que la producción de energía puede no ajustarse con la demanda o el consumo. La electrólisis se utiliza para convertir la energía eléctrica en hidrógeno en estos momentos en los que la generación de energía eléctrica es mayor que la demanda.

Un pequeño almacenamiento de hidrógeno es algo también esencial para el uso de las pilas de combustible en aplicaciones móviles. Como resultado de su posible importancia en la escena energética a nivel mundial como un vector energético de propósito general, se ha dedicado una gran atención al difícil problema que supone el almacenamiento del hidrógeno. Las dificultades aparecen por que a pesar de que el hidrógeno tiene uno de los mayores niveles de energía específica (energía por kilogramo) su densidad es muy baja, y tiene uno de los menores niveles de densidad de energía (energía por metro cúbico). Esto significa que para contener una gran masa de hidrógeno en un pequeño espacio se tienen que utilizar muy altas presiones. Otro problema es que, al contrario que otros gases portadores de energía, es muy difícil convertir el gas hidrógeno en líquido. No puede ser simplemente comprimido, como el butano o el LPG. Necesita ser enfriado hasta al menos unos 22° K, e incluso en su forma líquida su densidad continúa siendo bastante baja, 71 Kg/m³.

Aunque el hidrógeno pueda ser almacenado como un gas comprimido o un líquido, también se pueden utilizar métodos químicos para su almacenamiento. Existen muchos compuestos químicos que se pueden fabricar que acumulan, para su masa, cantidades relativamente grandes de hidrógeno. Para que estos compuestos sean realmente útiles deben poseer tres características esenciales:

- Debe ser posible conseguir que estos compuestos cedan su hidrógeno fácilmente. De otra manera no existen ventajas frente a la reforma de hidrocarburos.
- Deben ser seguros de manejar.
- El proceso de generación de estos compuestos debe ser simple y consumir muy poca energía; en otras palabras, la energía y el coste de

	<p>Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica.</p> <p>El caso de la producción de Hidrógeno.</p>	
---	---	---

financiación de introducir el hidrógeno en estos compuestos debe ser bajo.

Un gran número de compuestos químicos han sido sugeridos e incluso probados para realizar esta labor, sin embargo la gran mayoría de ellos no han logrado alcanzar alguna de estas tres características. De todas formas, algunos si han alcanzado las características necesarias y son utilizados en la práctica. Los compuestos más importantes de ellos implican el uso de hidruros metálicos. Existen dos formas básicas:

- El metal es una tierra rara, y el compuesto de hidrógeno es reversible. En las condiciones adecuadas simplemente libera el hidrógeno.
- El uso de hidruros metálicos alcalinos; estos reaccionan con el agua, liberando gas hidrógeno.

Otro método que aunque en la actualidad aun no resulta práctico, pero que en el futuro puede ser factible, es la uso de nanofibras de carbono. Aunque hasta ahora no ha habido claras demostraciones de que esta tecnología pueda ser factible.

Resumiendo, los principales métodos para almacenar hidrógeno que pueden ser utilizados en la actualidad son los siguientes:

- Compresión en cilindros para el almacenamiento de gases.
- Almacenamiento como líquido criogenizado.
- Almacenamiento en forma de hidruros de metal reversibles.
- El uso de la reacción de los hidruros de metal con el agua.

4.2.- Seguridad.

El hidrógeno es un elemento gaseoso único, ya que posee el peso molecular más bajo de todos los gases. Tiene la mayor conductividad térmica, y la menor viscosidad y densidad de todos los gases. Estas propiedades hacen que el hidrógeno tenga un índice de fuga a través de pequeños orificios más rápido que todos los demás gases. El hidrógeno se escapa 2,8 veces más rápido que el metano y 3,3 veces más rápido que el aire. Además, el hidrógeno es un gas altamente volátil e inflamable, y en ciertas circunstancias la mezcla de hidrógeno y aire puede llegar a ser explosiva. Las implicaciones para el diseño de los sistemas de pilas de combustible son obvias, y las consideraciones de seguridad deben ser muy tenidas en cuenta.

Por tanto, el hidrógeno debe ser tratado con mucha seguridad. Los sistemas deben ser diseñados con el menor riesgo de fugas posible, y deben ser revisados regularmente para que estas fugas no aparezcan. De todas maneras, debe quedar claro que, considerando todos los detalles, el hidrógeno no es más peligroso, y en algún caso incluso menos peligroso que otros gases

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	--	---

combustibles de uso común. En la siguiente tabla se comparan las propiedades clave en lo relativo a la seguridad, del hidrógeno y otros dos gases combustibles frecuentemente utilizados en la vida cotidiana, como el metano y el propano.

	Hidrógeno	Metano	Propano
Densidad, Kg/m ³ a NTP	0,084	0,65	2,01
Límites de ignición en aire, volumen % a NTP	De 4,4 a 77	De 4,4 a 16,5	De 1,7 a 10,9
Temperatura de ignición, °C	560	5470	487
Min. energía de ignición en aire, MJ	0,02	0,3	0,26
Max. ratio de combustión en aire, m/s	3,46	0,43	0,47
Límites de detonación en aire, volumen %	De 18 a 59	De 6,3 a 14	De 1,1 a 1,3
Ratio estequiométrico en aire	29,5	9,5	4,0

Figura 25: Magnitudes físicas y energéticas del Hidrógeno, Metano y Propano. Fuente: Ingeniería Química.

El mayor problema con el hidrógeno parece encontrarse en la mínima energía necesaria para la ignición, que aparentemente indica que puede inflamarse muy fácilmente. De todas formas, todas estas energías son muy bajas, menores que aquellas encontradas en la mayoría de casos prácticos. Una chispa puede encender cualquiera de estos combustibles. En contra de esto se debe tener en cuenta la mucha mayor concentración mínima necesaria para la detonación (18% por volumen). La menor concentración mínima para la ignición es muy similar a la del metano, y se necesitan una concentración considerablemente menor para el propano. La temperatura de ignición para el hidrógeno también es claramente más alta que la de los otros dos gases. Otro riesgo potencial proviene del relativamente alto rango de concentraciones necesarias para que se cause la detonación. Esto significa que se tiene que tener cuidado para prevenir la concentración de hidrógeno en espacios cerrados. Afortunadamente, esto se consigue fácilmente, ya que el hidrógeno es el gas que se dispersa con mayor rapidez de todos los gases.

Otro problema de seguridad que puede parecer con el hidrógeno, es que cuando se está quemando su llama es virtualmente invisible. Teniendo todo esto en cuenta, el hidrógeno es muy similar a los otros gases combustibles desde el punto de vista del peligro potencial que tienen. La densidad mucho menor del hidrógeno es la que proporciona una ventaja comparativa desde un punto de vista de la seguridad. La densidad del metano es similar a la del aire, lo que hace que no se disperse con rapidez, pero tiende a mezclarse con el aire. El propano tiene menor densidad que el aire, lo que tiende a hacerlo hundirse y acumularse en los puntos más bajos. Por otro parte, el hidrógeno es tan ligero que se dispersa rápidamente hacia arriba. Esto hace que los niveles

de concentración necesarios para que se produzca una ignición o la detonación sean difíciles de producirse. El hidrógeno, como todos los combustibles, debe ser manejado con cuidado. De todas formas, teniendo todo en cuenta, no representa un mayor peligro potencial que cualquier otro líquido o gas inflamable de uso común en la actualidad. En algunas aplicaciones, como por ejemplo en los barcos, tiene muchas ventajas en cuanto a la seguridad comparado con lo que se generalmente se está utilizando en la actualidad.

4.3.- Almacenamiento como gas comprimido.

El almacenamiento del hidrógeno en cilindros presurizados es el método técnicamente más sencillo, y más ampliamente utilizado para el almacenamiento de pequeñas cantidades de gas. El hidrógeno se almacena de esta manera en miles de lugares, y en la mayoría de localizaciones las compañías locales están listas para suministrar estos cilindros en un amplio rango de tamaños. De todas formas, en estas aplicaciones el hidrógeno es casi siempre un agente químico dentro de un proceso analítico o de producción.

Cuando se considera el uso y almacenamiento del hidrógeno de esta manera como un vector energético, la situación no es tan satisfactoria. A continuación compararemos dos sistemas de almacenamiento a presión. El primer es un cilindro estándar de aleación de acero a 200 bar, del tipo que se utiliza comúnmente en los laboratorios. El segundo es para el almacenamiento de hidrógeno a mayor escala en un autobús. Este tanque está construido por una primera capa de aluminio de 6 mm de grosor, alrededor del cual se enrolla un compuesto de fibras y resina epoxy.

	TIPO DE MATERIAL	
	2L acero, 200 bar	147L composite, 300 bar
Masa del cilindro vacío	3 kg	100 kg
Masa de hidrógeno almacenado	0,036 kg	3,1 kg
Eficiencia almacenamiento (% masa H ₂)	1,2 %	3,1 %
Energía específica	0,47 kWh/kg	1,2 kWh/kg
Volumen tanque (aprox.)	2,2 litros	220 litros
Masa de H ₂ /litro	0,016 kg/l	0,014 kg/l

Figura 26: Características de los materiales para almacenamiento como gas comprimido.
Fuente: Sistemas de Almacenamiento del Hidrógeno.

Algo que sin lugar a dudas hay que tener en cuenta, es que los tanques compuestos en la actualidad son tres veces más caros que los tanques de aleación de acero de la misma capacidad.

	<p>Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica.</p> <p>El caso de la producción de Hidrógeno.</p>	
---	---	---

El sistema de almacenamiento a mayor escala es, como se esperaba, mucho más eficiente. Sin embargo, esto es algo engañoso. Estos grandes tanques tienen que ser sostenido en el vehículo, y el peso necesario para poder hacer esto debe ser tenido en cuenta. Otro punto a tener en cuenta es que en ambos casos hemos olvidado el peso de las válvulas de conexión, así como de los reguladores de presión. Esto hace que se reduzca la eficiencia del almacenamiento en ambos casos.

La causa para la poca cantidad de masa de hidrogeno almacenada es, incluso a esas presiones, es por supuesto su baja densidad. Normalmente menos del 2% de la masa del sistema de almacenamiento es hidrógeno en sí mismo.

El gas hidrógeno presurizado se utiliza principalmente en cantidades bastante pequeñas, y tiene que ser transportado con mucho cuidado.

El metal del que esté hecho el cilindro a presión debe ser elegido cuidadosamente. El hidrógeno es una molécula muy pequeña, muy veloz, y por tanto, capaz de difundirse entre materiales que son impermeables para otros gases. Esto es agravado por el hecho de que una pequeña fracción de las moléculas del gas hidrógeno se puedan disociar sobre la superficie del material. Entonces puede ocurrir la difusión del los átomos de hidrógeno dentro del material, lo que puede afectar al comportamiento mecánico del material de muchas maneras.

De la misma manera que el problema con la alta masa, existen considerables problemas de seguridad asociados a la hora de almacenar el hidrógeno a altas presiones. Una fuga en uno de estos cilindros generaría unas fuerzas muy grandes mientras que el gas es propulsado.

Es posible que uno de esto cilindros se convierta básicamente en un torpedo, y causar un daño considerable. Más aún, una fractura en un cilindro es muy probable que vaya acompañada por la autoignición de la mezcla de aire y gas expulsada, con el consiguiente fuego hasta que el contenido del cilindro fracturado se haya consumido. A pesar de todo, este método es ampliamente utilizado de forma segura, los problemas de seguridad que vienen acompañados, especialmente aquellos asociados con la alta presión, se evitan mediante un uso correcto siguiendo la medidas de seguridad adecuadas.

4.4.- Almacenamiento como líquido.

El almacenamiento de hidrógeno en forma de líquido (comúnmente llamado LH₂), a unos 22^oK, es el único método utilizado actualmente de manera regular para almacenar grandes cantidades de hidrógeno. Un gas enfriado hasta convertirse en líquido de esta manera es denominado líquido criogénico. Actualmente se utilizan grandes cantidades de hidrógeno criogénico en procesos como el refinamiento de petróleo o la producción de amonio. Otro usuario destacado de este tipo de hidrógeno es la NASA, que dispone de unos



Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica.

El caso de la producción de Hidrógeno.



enormes tanques de 3.200 m³, para asegurarse un suministro continuo de hidrógeno para el programa espacial.

El contenedor de hidrógeno es un gran termo, fuertemente reforzado. El hidrógeno líquido se evaporará lentamente, y la presión en el contenedor normalmente se mantiene por debajo de los 3 bar, aunque algunos contenedores más grandes pueden soportar presiones más altas.

Si la tasa de evaporación excede la demanda, entonces el tanque es purgado ocasionalmente para asegurarse de que la presión no aumenta demasiado. Las pequeñas cantidades de hidrógeno normalmente son liberadas a la atmósfera. Como medida de seguridad se dispone de un disco rompible. Esto consiste en un anillo cubierto por una membrana de grosor controlado, de tal manera que se rompa a una determinada presión límite para la seguridad, liberando el gas. El gas continuará siendo liberado hasta que se reponga el disco.

Cuando el tanque de hidrógeno líquido se está llenando, y cuando el combustible está siendo retirado, es muy importante que no se permita la entrada de aire en el sistema, ya que se podría formar una mezcla explosiva. El tanque se tiene que purgar con nitrógeno antes de ser llenado.

Aunque normalmente son usados para grandes cantidades de hidrógeno, se ha dedicado un considerable esfuerzo y trabajo en el diseño y desarrollo de tanques de hidrógeno líquido para coches, aunque esto no ha sido conectado directamente con las pilas de hidrógeno.

El tanque utilizado en estos coches de hidrógeno tiene forma cilíndrica, y tiene la habitual doble pared, de la construcción tipo de un termo. Las paredes tienen un grosor de 3 cm, y consiste en 70 capas de láminas de aluminio entre lazadas con fibra de vidrio. La máxima presión de operación es de 5 bar. El tanque almacena 120 litros de hidrógeno criogénico. La densidad del hidrógeno líquido es muy baja, alrededor de 71 kg/m³, por lo que 120 litros son sólo 8,5 Kg. de hidrógeno.

	TIPO DE MATERIAL
	LH₂ contenedor para coches
Masa del cilindro vacío	51,5 kg
Masa de hidrógeno almacenado	8,5 kg
Eficiencia almacenamiento (% masa H ₂)	14,2 %
Energía específica	5,57 kWh/kg
Volumen tanque (aprox.)	200 litros
Masa de H ₂ /litro	0,0425 kg/l

Figura 27: Características de los materiales para almacenamiento como líquido comprimido. Fuente: Sistemas de Almacenamiento del Hidrógeno.

	<p>Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica.</p> <p>El caso de la producción de Hidrógeno.</p>	
---	---	---

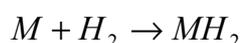
El combustible hidrógeno utilizado para alimentar los sistemas que se emplean en los motores de coches normalmente no puede ser aplicado tal cual a las pilas de combustible. Una diferencia notable es que en los motores de hidrógeno líquido es que el hidrógeno normalmente es introducido todavía en su forma líquida. Al ser un gas, el estar a baja temperatura es una ventaja, ya que así permite que la masa de la mezcla combustible/aire que entra en el motor sea mayor. Para las pilas de combustible, el hidrógeno necesita ser obviamente un gas y estar también precalentado. De todas formas, esto no supone un problema técnico importante, ya que existen muchas oportunidades de aprovechar el calor desechado por la pila a través de intercambiadores de calor.

Uno de los problemas asociados al hidrógeno criogénico es que la licuación del hidrógeno es muy intensiva energéticamente. Hay diversas etapas implicadas en el proceso. El gas primero se comprime, y después se enfría hasta 78° K utilizando nitrógeno líquido. Entonces la alta presión se utiliza para un posterior enfriamiento expandiéndolo a través de una turbina. Se necesita un procedimiento adicional para convertir el hidrógeno del isómero donde las vueltas nucleares de los dos átomos son paralelas (ortohidrógeno) a aquel en que son antiparalelas (paralelhidrógeno). Este proceso es exotérmico, y si se permite que tenga lugar de forma natural causaría la evaporación del líquido. En total, la energía requerida para licuar el gas es alrededor del 40% del poder calorífico del hidrógeno.

Además de los problemas de seguridad habituales con el hidrógeno, existe una serie de dificultades específicas relativas al hidrógeno criogénico. La congelación es uno de los riesgos a tener en cuenta. La piel humana se congela con facilidad si entra en contacto con superficies criogénicas. Todas las tuberías que contengan este fluido deben ser aisladas, así como cualquier parte que tenga un buen contacto térmico con estas tuberías. El aislamiento también es necesario para prevenir que el aire que hay alrededor se condense sobre las tuberías, ya que se puede generar un peligro de explosión si el aire líquido se mezcla con los combustibles cercanos. De todas formas, los peligros del hidrogeno son menores con el hidrógeno líquido que con el gas a presión. Una de las razones es que si se produce un fallo en el contenedor, el combustible tiende a permanecer dentro de él, y escapar a la atmósfera más lentamente.

4.5.- Almacenamiento en hidruros de metal.

Ciertos metales, particularmente aleaciones de titanio, hierro, manganeso, níquel, cromo, y otros, pueden reaccionar con el hidrógeno dando lugar a un hidruro de metal a través de una reacción reversible fácilmente controlable. La ecuación general es la siguiente:





**Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no
integrables en la red eléctrica.**

El caso de la producción de Hidrógeno.



Hacia la derecha, la reacción es moderadamente exotérmica. Entonces para liberar el hidrógeno, se deben aportar pequeñas cantidades de calor. De todas formas, se pueden elegir distintos tipos de aleaciones metálicas para el hidruro, de tal forma que la reacción puede tener lugar dentro de un amplio rango de temperaturas y presiones. En concreto, es posible elegir aleaciones adecuadas para operar a una presión similar a la atmosférica, y a temperatura ambiente.

Entonces, el sistema funciona de la siguiente manera. El hidrógeno se suministra a una presión un poco mayor que la atmosférica a la aleación del metal, dentro de un contenedor.

La reacción se da lugar hacia la derecha, y se forma el hidruro metálico. Esto es ligeramente exotérmico, normalmente la refrigeración por aire es suficiente. Esta etapa dura unos minutos, dependiendo del tamaño del sistema, y de si el contenedor está enfriado. Esto tiene lugar a aproximadamente temperatura constante.

Una vez que todo el metal ha reaccionado con el hidrógeno, la presión empezará a aumentar. Esta es la señal para cortar el suministro de hidrógeno. El contenedor, que ahora contiene el hidruro metálico, se sella herméticamente. Hay que tener en cuenta que el hidrógeno sólo se almacena a presiones moderadas, típicamente alrededor de 2 bar.

Cuando se necesita el hidrógeno, el contenedor se conecta, por ejemplo, a la pila de combustible. Entonces la reacción procede hacia la izquierda, y el hidrógeno es liberado. Si la presión aumenta por encima de la atmosférica la reacción se hará más lenta o incluso se detendrá.

Ahora la reacción es endotérmica, por lo que se le tiene que suministrar energía. Esta energía es suministrada por los alrededores; el contenedor se irá enfriando lentamente mientras que se libera hidrógeno. Puede ser calentado ligeramente para aumentar la velocidad de la reacción, utilizando, por ejemplo, agua caliente o el aire del sistema de refrigeración de la pila de combustible.

Una vez que se ha completado la reacción, y se ha liberado todo el hidrógeno, se puede volver a repetir todo el proceso. Normalmente se pueden llegar a completar varios cientos de ciclos de carga y descarga.

El hidruro no puede ser utilizado por sí mismo, debe estar almacenado en un contenedor. Aunque el hidrógeno no esté almacenado a presión, el contenedor debe ser capaz de soportar presiones razonablemente altas, ya que seguramente sea llenado a través de un suministro de alta presión, y debe tener una tolerancia ante un error humano.

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	--	---

TIPO DE MATERIAL	
Pequeño contenedor de hidruro para equipamiento electrónico portátil	
Masa del cilindro vacío	0,26 kg
Masa de hidrógeno almacenado	0,0017 kg
Eficiencia almacenamiento (% masa H ₂)	0,65 %
Energía específica	0,26 kWh/kg
Volumen tanque (aprox.)	0,06 litros
Masa de H ₂ /litro	0,028 kg/l

Figura 28: Características de los materiales para almacenamiento de hidruros metálicos.
Fuente: Sistemas de Almacenamiento del Hidrógeno.

Una de las principales ventajas de este método es su seguridad. El hidrógeno no se almacena a una presión significativa, y por ello no tiene el peligro de descargarse rápidamente.

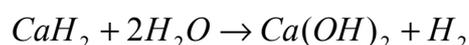
En cambio, si la válvula sufre daños, o hay una fuga en el sistema, la temperatura en el contenedor disminuirá, lo que inhibirá la liberación del hidrógeno. La baja presión simplifica en gran medida el diseño del suministro de combustible. Esto resulta muy prometedor para un gran número de aplicaciones en las que se almacenan pequeñas cantidades de hidrógeno. Es especialmente adecuado para aplicaciones donde el peso no es un problema, pero el espacio sí lo es.

Las desventajas son particularmente evidentes cuando se necesita almacenar grandes cantidades de hidrógeno, como por ejemplo en los coches. La energía específica es pobre. Además, el problema del calentamiento durante el llenado y el enfriamiento durante la liberación del hidrógeno se acentúa.

Se han probado grandes sistemas para vehículos, y tiempo típico de llenado es alrededor de una hora para un tanque de aproximadamente 5 kg. La otra desventaja principal es que normalmente se debe utilizar hidrógeno de muy alta pureza, de otra forma los metales quedan contaminados, al reaccionar irreversiblemente con las impurezas.

4.6.- Almacenamiento en hidruros metálicos alcalinos.

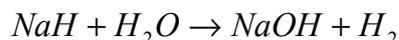
Una alternativa a los hidruros metálicos reversibles son los hidruros metálicos alcalinos que reaccionan con el agua para liberar hidrógeno, y producir un hidróxido metálico. La reacción que tiene lugar al ponerse en contacto estos hidruros con el agua es la siguiente:



	<p>Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica.</p> <p>El caso de la producción de Hidrógeno.</p>	
---	---	---

Se puede decir que el hidrógeno está siendo liberado del agua por la acción del hidruro. Otro método que es utilizado comercialmente, bajo el nombre registrado de “Powerballs”, está basado en el hidruro de sodio. Este está suministrado en forma de esferas de polietileno de unos 3 cm de diámetro. Se depositan bajo el agua, y se parten por la mitad cuando es necesario para producir hidrógeno.

Una unidad integral contiene el agua, el hidróxido de sodio, y un mecanismo de corte controlado por un microprocesador para asegurar un continuo suministro de hidrógeno. En este caso la reacción es la siguiente:



Esta es una manera muy simple de producir hidrógeno, y su densidad energética y su energía específica puede ser tan buena o mejor que otros métodos que hemos considerado hasta ahora. El sodio es un elemento muy abundante, y por tanto el hidruro de sodio no es caro. Los principales problemas de este método son los siguientes:

- La energía necesaria para fabricar y transportar los hidruros es mayor que la que se puede llegar a liberar en la pila de combustible.
- La necesidad de disponer de una corrosiva y desagradable mezcla de hidróxido y agua. En teoría, esto puede ser reciclado para producir nuevos hidruros, pero la infraestructura necesaria para conseguirlo sería muy difícil.
- El hecho de que el hidróxido tiende a atraer y sujetar moléculas de agua, lo que significa que los volúmenes de agua requeridos tienden a ser considerablemente mayores de los implican las ecuaciones anteriores.

Otro punto a tener en cuenta es que este método no es mucho mejor si lo comparamos con las baterías aire metal. Si el usuario está preparado para utilizar grandes cantidades de agua, y está preparado para disponer de mezclas de agua e hidróxidos metálicos, entonces sistemas como las baterías de aluminio/aire o magnesio/aire son preferibles.

Con un electrolito de agua salada, una batería de aluminio/aire puede operar a 0.8 voltios y a una densidad de corriente bastante alta, produciendo tres electrones por cada átomo de aluminio. El sistema del electrodo es mucho más barato y simple que una pila de combustible.

Aún así, el sistema se compara bastante bien con los demás sistemas en varios aspectos. La eficiencia de almacenamiento se compara bien con otros sistemas. Este método puede tener nichos de aplicaciones donde el depositar hidróxidos no sea un problema, aunque esto tiende a estar limitado.

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	--	---

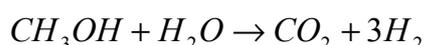
TIPO DE MATERIAL	
Contenedor para producir 1 kg de hidrógeno usando agua e hidróxido sódico	
Masa del cilindro vacío y materiales	45 kg
Masa de hidrógeno almacenado	1,0 kg
Eficiencia almacenamiento (% masa H ₂)	2,2 %
Energía específica	0,87 kWh/kg
Volumen tanque (aprox.)	50 litros
Masa de H ₂ /litro	0,020 kg/l

Figura 29: Características de los materiales para almacenamiento de hidruros metálicos alcalinos. Fuente: Sistemas de Almacenamiento del Hidrógeno.

4.7.- Dificultades y objetivos del almacenamiento de hidrógeno.

Antes de comparar los distintos métodos de almacenamiento primero debemos hacer una comparación con el metanol. El metanol se puede reformar de una forma relativamente fácil para producir hidrógeno, y resulta una prometedora forma de almacenamiento de hidrógeno, incluso para sistemas bastante pequeños.

El metanol puede ser reformado para producir hidrógeno por la reforma con vapor, de acuerdo a la siguiente reacción:



Esto da lugar a 0,188 Kg. de hidrógeno por cada Kg. de metanol. Sin embargo, su completa utilización no es posible – nunca esta con mezclas de gas que contengan dióxido de carbono. También, se necesita parte del hidrógeno producido para aportar energía para la reacción de reforma. Si suponemos que la utilización del hidrógeno puede ser del 75%, entonces podemos obtener 0,14 Kg. de hidrógeno por cada Kg. de metanol. Una aplicación particular del hidrógeno derivado del metanol es la de los vehículos motorizados. Se puede especular que se utilizará un tanque de metanol de 40 Kg., con un reformador de aproximadamente el mismo tamaño y peso que el tanque. Dicho sistema debería ser posible en un futuro cercano y tendría las siguientes características:

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	--	---

TIPO DE MATERIAL	
Fuente de hidrógeno almacenado 40L de metanol	
Masa del reformador y el tanque	31,6 kg
Masa de hidrógeno almacenado	4,4 kg
Eficiencia almacenamiento (% masa H ₂)	13,9 %
Energía específica	5,5 kWh/kg
Volumen tanque (aprox.)	80 litros
Masa de H ₂ /litro	0,055 kg/l

Figura 30: Características de los materiales para almacenamiento de hidrógeno. Fuente: Sistemas de Almacenamiento del Hidrógeno.

Se puede ver que la comparación es muy favorable al metanol respecto a todos los demás métodos, incluido el hidrógeno criogénico. Más aún, el metanol es mucho más seguro, simple y barato de transportar.

A continuación se muestran los rangos de las medidas gravimétricas y volumétricas de los principales sistemas candidatos para los que los datos están disponibles actualmente. A excepción del metanol, que se incluye como comparación, estos datos se refieren a sistemas reales que están disponibles, y no a ningún material o método que pueda o no estar disponible en el futuro.

METODO	Eficiencia de almacenamiento gravimétrica. % masa de hidrógeno	Masa volumétrica (en kg) de hidrógeno por litro
Gas a presión	0,7 – 3,0	0,015
Hidruro de metal reversible	0,65	0,028
Agua + hidruro de metal	2,2	0,020
Líquido criogénico	14,2	0,040
Metanol reformado	13,9	0,055

Figura 31: Eficiencias de almacenamiento en función del método de almacenamiento. Fuente: Sistemas de Almacenamiento del Hidrógeno.

Obviamente estos datos no pueden usarse por sí solos (no incluyen los costes, por ejemplo). Los aspectos relativos a la seguridad tampoco aparecen en esta tabla. Varios de los sistemas simplemente no son adecuados para pequeñas aplicaciones. Otro factor es que algunos de los sistemas también son un

	<p>Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica.</p> <p>El caso de la producción de Hidrógeno.</p>	
---	---	---

método de suministro y transporte de hidrógeno, mientras que otros no lo son. Por ejemplo, el método de hidruro de metal alcalino más agua puede ser utilizado para proveer de hidrógeno a pequeños usuarios, ya que los compuestos tienen un coste relativamente bajo, y pueden ser transportados fácilmente. El hidruro de metal reversible es sólo un almacenamiento, y debe ser llenado por una fuente local de hidrógeno.

4.8.- Análisis DAFO del almacenamiento de hidrógeno.

Después de un análisis de la estructura de agentes, situación y acciones en materia de almacenamiento de hidrógeno se obtienen los siguientes resultados.

OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Integración con técnicas renovables de generación energética para suplir la variabilidad de estas. • Existencia de fondos europeos. • Potenciación de las redes de transporte y distribución de energía del país. • Iniciativa de coordinación de los grupos de investigación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Percepción social de peligro. • Pérdida de oportunidades y liderazgo tecnológico frente a otros países.
FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Existencia de grupos consolidados de I+D. • Gran potencial de las energías renovables en España. • Existencia de una red robusta de gas natural de transporte y distribución energética. • Versatilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Escasa implicación empresarial en I+D aplicado al almacenamiento. • Baja coordinación de los grupos de investigación. • Insuficiente dedicación de centros de investigación. • Falta de mercado.

Figura 32: Análisis DAFO del sistema de almacenamiento del Hidrógeno. Fuente: Elaboración Propia.

	<p>Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica.</p> <p>El caso de la producción de Hidrógeno.</p>	
---	---	---

4.9.- Conclusiones.

Para conseguir que se generalice el uso del hidrógeno como vector energético, se debe lograr su transporte y almacenamiento de forma económica. Esto supone un considerable cambio con respecto al transporte y almacenamiento de los combustibles fósiles convencionales, debido a la baja densidad energética de este gas.

En la actualidad existen distintas formas de almacenar hidrógeno, tanto para aplicaciones estacionarias como para el sector del transporte (en forma gaseosa, líquida, combinado químicamente o adsorbido en sólidos porosos), dependiendo su elección de diferentes factores como el proceso final en el que se vaya a emplear, la densidad energética requerida, la cantidad a almacenar y la duración del almacenamiento, la existencia de otras posibles formas de energía disponibles, los costes y necesidades de mantenimiento de la instalación, y los costes de operación.

En el caso del empleo de hidrógeno como combustible para el transporte, uno de los principales problemas a resolver es la falta de los medios adecuados para su almacenamiento en el propio vehículo, cumpliendo los requisitos de seguridad, costes, y las características de suministro requeridas. El Departamento de Energía de Estados Unidos establece como objetivos a conseguir en el almacenamiento de hidrógeno al menos una eficiencia en peso (relación entre el hidrógeno almacenado y el peso del sistema de retención) del 6%, o expresado en densidad, 60 kg/m^3 ya que un vehículo con una pila de combustible de hidrógeno necesitaría más de 3 kg de hidrógeno para una autonomía de unos 500 km.