



Operación y mantenimiento de equipos electrolizadores de tecnología PEM

TEMA 1:

Introducción al Hidrógeno como vector energético.

Título del Proyecto: “Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España”.

Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002



“Financiado por la Unión Europea –



NextGenerationEU”

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN AL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO..... 3

1.1 El hidrógeno como elemento químico..... 3

1.2 Obtención de hidrógeno..... 5

1.2 El hidrógeno como materia prima 8

1.3 El hidrógeno como vector energético..... 9

1.4 La cadena de valor del hidrógeno energético 9

1.5 Almacenamiento..... 10

1.5.1 Hidrógeno gas 11

1.5.2 hidrógeno líquido, 12

1.5.3 Almacenamiento en materiales solidos. 12

1.6 Distribución..... 14

1.6.1 Sistemas de distribución de hidrógeno..... 14

1.6.2Energy Carriers 14

1.7 Estaciones de servicio de hidrógeno..... 16

1.8 Usos del hidrógeno 17

1.8.1 La Pila de combustible. 17

1.8.2 Aplicaciones móviles 20

1.8.3 Aplicaciones estacionarias 20

1 INTRODUCCIÓN AL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

1.1 EL HIDRÓGENO COMO ELEMENTO QUÍMICO.

El hidrógeno es un gas sin color, sin olor, sin sabor y no tóxico en estado natural. Es la sustancia más básica identificada por los seres humanos: formada por el átomo más simple. El hidrógeno contiene un solo protón y un solo electrón.

Por lo general se presenta como una molécula formada por dos átomos de hidrógeno, en una molécula diatómica. El 90% del universo en términos de peso, corresponde al hidrógeno como elemento y siendo tercer elemento más común en la Tierra.

En su estado natural, es raro encontrar hidrógeno en nuestro planeta debido a su rápida reacción con otros elementos. Unido al oxígeno, forma agua en forma de H_2O . Cuando se combina con carbono, puede dar origen a diferentes elementos como metano, (CH_4), el carbón o el petróleo.

Las características principales del hidrógeno son:

Densidad

Es el elemento más ligero de la tabla periódica con una densidad de 0.0899 kg/Nm^3

Poderes caloríficos superior e inferior

Tiene un alto contenido de energía por unidad de masa con uno Poder Calorífico Superior de 141 MJ/kg e Inferior de 119 MJ/kg más alto que el de combustibles tradicionales, teniendo mayor poder calorífico, tres veces mayor es la eficiencia del hidrógeno en comparación con la gasolina. A causa de su baja densidad bajo condiciones normales, cuenta con una baja densidad energética por unidad de volumen con una densidad de energía de 10.79 MJ/m^3 .

Inflamabilidad

El hidrógeno no es explosivo, es una molécula estable, y a diferencia de los explosivos, el hidrógeno necesita una fuente de ignición externa para que se produzca la ignición. Para que el hidrógeno arda son necesarias tres condiciones: que el hidrógeno se mezcle con un oxidante, que la mezcla esté dentro de los límites de inflamabilidad y que esté presente una fuente apropiada de ignición. Las mezclas de hidrógeno con aire, oxígeno, u otros oxidantes son altamente inflamables en un amplio rango de composiciones. Los límites de inflamabilidad, en porcentaje en volumen, definen el rango en el cual los combustibles gaseosos se incendian cuando están expuestos a una fuente de ignición con suficiente energía. Los límites de inflamabilidad son dependientes de la energía de ignición, de la temperatura, de la presión, de la presencia de diluyentes y del tamaño y configuración del equipo, instalaciones o aparatos. El rango de inflamabilidad de las mezclas hidrógeno-aire e hidrógeno-oxígeno se amplían si la propagación de la llama es hacia arriba y se estrechan si la propagación de la llama es hacia abajo.

Los límites de inflamabilidad del hidrógeno en aire seco a una presión de 101.3 kPa ($1,013 \text{ Bar}$) y a una temperatura de 298 K ($24,85^\circ$) son de 4.1% y 74.8% , para los límites inferior y superior respectivamente. Para el caso de la mezcla hidrógeno-oxígeno son de 4.1% y 94% . Una reducción en la presión por debajo de 101.3 kPa tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, aumentando el límite inferior y disminuyendo el superior.

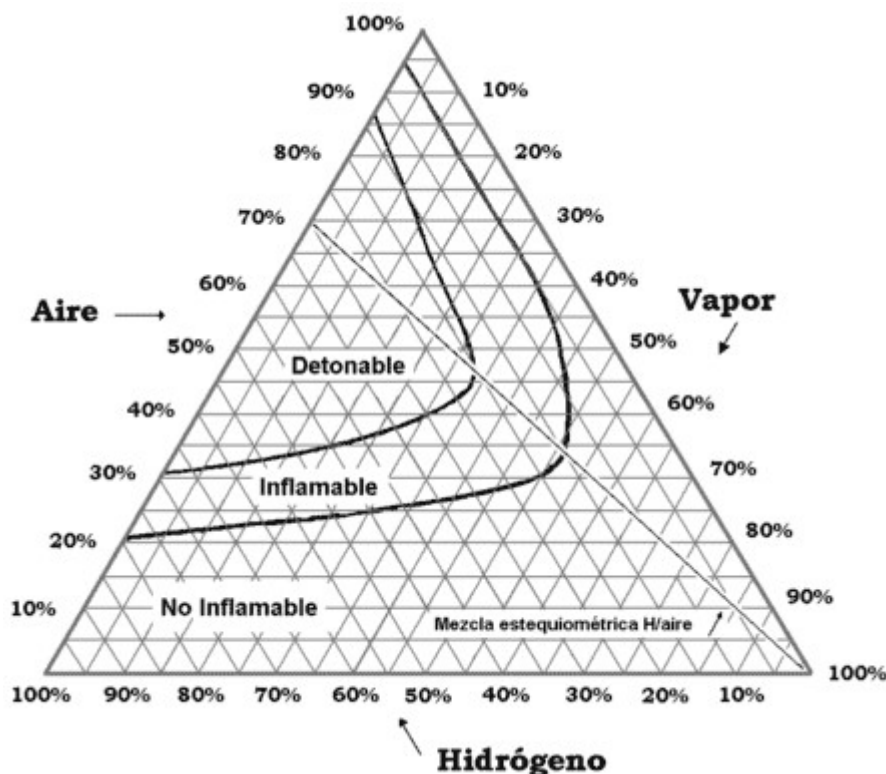


Ilustración 1: Límites de inflamabilidad del hidrógeno.

Fuente: Cluster de seguretat contra incendis

Temperatura de Autoignición

Las temperaturas de ignición son dependientes de la concentración y presión del hidrógeno gaseoso y del tratamiento superficial de los contenedores. Las temperaturas obtenidas son muy dependientes del sistema y de los valores seleccionados y sólo se deben aplicar a sistemas similares. A una presión de 101.3 kPa el rango de temperaturas de autoignición para hidrógeno estequiométrico en aire está entre 773 a 850 K (500 y 575°C); en oxígeno estequiométrico está entre 773 a 833 K (500 y 533°C)

Energía mínima de la chispa para la ignición

La mínima energía de la chispa para la ignición se define como la mínima energía de la chispa requerida para incendiar la concentración más fácilmente incendiabile del combustible en aire u oxígeno. La mínima energía de chispa requerida para incendiar el hidrógeno es considerablemente inferior que la del metano (0.29mJ) o la de la gasolina (0.24mJ); sin embargo, la energía de ignición de estos tres combustibles es lo suficientemente baja que es relativamente cierto en presencia de cualquier fuente de ignición débil; como chispas, cerillas, superficies calientes, electricidad estática de un cuerpo humano puede ser suficiente para incendiar cualquiera de estos combustibles en aire.

Franja de extinción

La franja de extinción del hidrógeno a temperatura y presiones normales (NTP) del aire es de 0.6mm. Este valor depende de la temperatura, presión y composición de la mezcla del combustible gaseoso.

Detonación

El peor suceso resultante de la liberación de hidrógeno, es que se mezcle con un oxidante (normalmente aire), que la mezcla se sitúe dentro de las concentraciones de detonación, y que por lo tanto produzca una mezcla detonante. La flotabilidad positiva y la rápida difusión molecular del hidrógeno gaseoso hacen que cualquier escape se mezcle rápidamente con el gas de los alrededores. Si se produce la detonación, el resultado en la zona de reacción es una onda de choque y la onda expansiva que le acompaña que tiene un gran potencial para causar daños personales o de los equipos.

1.2 OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO.

El hidrógeno se presenta como una de las principales esperanzas para la transición energética global. Impulsado por los avances tecnológicos y la imperiosa necesidad de abandonar los combustibles fósiles para mitigar el cambio climático, este elemento—el más abundante del universo—está comenzando a ser utilizado para producir energía limpia, segura, constante, eficiente y fácilmente almacenable. La Unión Europea, por ejemplo, ha proyectado que para 2050 el 14% de su suministro energético provendrá del hidrógeno. No obstante, el camino hacia un futuro donde el hidrógeno juegue un papel clave será largo y costoso, y su implantación efectiva depende de la creación de una infraestructura adecuada para su producción y transporte.

El uso del hidrógeno como fuente de energía enfrenta tres desafíos principales. Primero, en su forma natural, el hidrógeno no se encuentra aislado, sino combinado con otros elementos, lo que requiere procesos energéticamente intensivos para su separación. Segundo, al ser un gas, debe ser licuado para su transporte y almacenamiento, incrementando los requisitos técnicos e infraestructurales. En tercer lugar, estas complejidades resultan en inversiones substanciales que aumentan su costo final, dificultando su competitividad económica frente a otras fuentes de energía.

A pesar de estos obstáculos, el número de proyectos y empresas dedicados a la exploración del hidrógeno está creciendo de manera exponencial. Las posibilidades de producción se amplían continuamente, tanto en términos de las fuentes de energía primaria utilizadas en su obtención, como de las técnicas aplicadas para su separación.

Según la sostenibilidad de las opciones elegidas, ha surgido una clasificación internacional que denomina a los diferentes tipos de hidrógeno con nombres de colores, reflejando sus características y origen.

Hidrógeno Negro o Marrón

El hidrógeno negro o marrón es el más contaminante de todos. Este tipo de hidrógeno se produce a partir de carbón bituminoso o lignito, respectivamente, mediante un proceso conocido como gasificación. En este proceso, el carbón se quema a temperaturas muy elevadas, lo que resulta en la liberación de dihidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO). La combustión del carbón no solo produce hidrógeno, sino también una significativa cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y otros contaminantes, lo que lo convierte en una opción altamente perjudicial para el medio ambiente.

Hidrógeno Gris

El hidrógeno gris, por su parte, se genera a partir de hidrocarburos, principalmente gas natural, utilizando un método llamado reformado con vapor. Este proceso implica la utilización de vapor a alta presión para disociar el carbono del hidrógeno en el metano (CH_4), el principal componente del gas natural. Aunque el hidrógeno gris es menos contaminante que el hidrógeno negro o marrón, sigue contribuyendo significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la liberación de CO_2 durante el proceso de reformado.

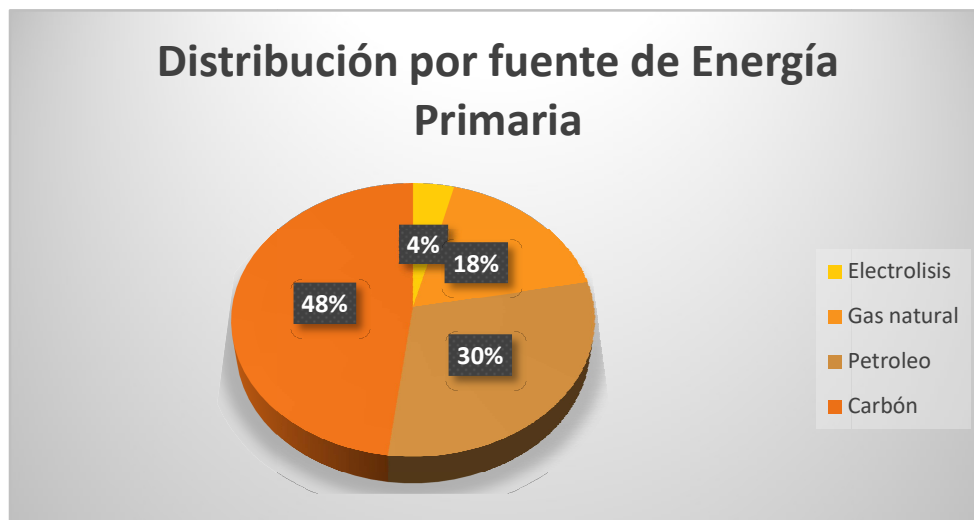


Ilustración 2: Origen del hidrógeno según fuente primaria de energía.

Fuente: Elaboración propia.

Hidrógeno Azul

El hidrógeno azul se obtiene mediante procesos similares al hidrógeno gris, es decir, a partir de hidrocarburos como el gas natural mediante reformado con vapor. Sin embargo, se diferencia en la incorporación de sistemas de captura y almacenamiento de carbono (CCS), los cuales atrapan y almacenan el CO₂ producido, reduciendo así las emisiones netas de gases de efecto invernadero. Este tipo de hidrógeno es actualmente uno de los más producidos junto con el hidrógeno gris.

Hidrógeno Turquesa

El hidrógeno turquesa representa una opción emergente que, al igual que el hidrógeno gris y azul, se basa en el uso de hidrocarburos. Sin embargo, emplea un proceso alternativo conocido como pirolisis, que consiste en la degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno. Este método produce carbono sólido en lugar de CO₂, facilitando su manejo y potencial reutilización. Aunque prometedora, esta tecnología aún se encuentra en etapas iniciales de desarrollo.

Hidrógeno Verde

El hidrógeno verde es probablemente el más conocido y se produce a partir de fuentes de energía renovables mediante electrólisis, un proceso que utiliza una corriente eléctrica para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. Esta opción es altamente sostenible, pero requiere una gran cantidad de electricidad, la cual puede no estar siempre disponible de manera continua. Por lo tanto, su producción podría limitarse a momentos de excedente de energía renovable, como cuando se satura la red eléctrica o disminuye la demanda energética.

Hidrógeno Rosa y Amarillo

El hidrógeno rosa se produce utilizando energía nuclear para alimentar el proceso de electrólisis. Por otro lado, el hidrógeno amarillo se genera a partir de energía solar, aunque esta denominación también puede aplicarse al hidrógeno producido con una mezcla de diferentes fuentes energéticas.

Título del Proyecto: "Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España". Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

Hidrógeno Blanco

El hidrógeno blanco o geológico se refiere al hidrógeno que se encuentra de forma natural en depósitos subterráneos. Esta fuente de hidrógeno aún está en fase exploratoria, y no se ha desarrollado una estrategia efectiva para su extracción a gran escala.



Ilustración 3: Los colores del hidrógeno

1.2 EL HIDRÓGENO COMO MATERIA PRIMA

El hidrógeno desempeña un papel crucial como materia prima en diversas aplicaciones industriales, siendo la industria química su principal consumidora actual. La mayoría del hidrógeno utilizado hoy, se obtiene de combustibles fósiles, un proceso que genera altas emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Este artículo examina los usos industriales del hidrógeno, los desafíos asociados a su

Uno de los usos más significativos del hidrógeno es la síntesis de amoníaco, esencial para la fabricación de abonos nitrogenados. Estos fertilizantes son fundamentales para alimentar a una población mundial que es aproximadamente seis veces mayor que hace un siglo, sin un incremento proporcional del terreno agrícola. Con el crecimiento de sociedades más ricas, se anticipa un aumento en la demanda de carne, lo cual a su vez incrementará la necesidad de ciertos cultivos, reforzando la importancia de los abonos nitrogenados .

El hidrógeno también es vital en la fabricación de plásticos y diversos productos químicos. La sustitución del hidrógeno derivado de combustibles fósiles por hidrógeno renovable en estos procesos puede reducir significativamente las emisiones de CO₂, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

En la industria siderúrgica, el hidrógeno puede reemplazar al carbón de coque en los altos hornos, donde se utiliza tanto como fuente de energía como agente químico reductor. Actualmente, existen plantas de demostración que exploran esta tecnología, con miras a su desarrollo a gran escala. La implementación de hidrógeno renovable en la producción de acero podría eliminar las emisiones de CO₂ asociadas a este proceso, representando un avance importante hacia la descarbonización industrial.

La adopción del hidrógeno renovable en aplicaciones industriales es esencial para alcanzar los objetivos de emisiones neutras de CO₂. Sin embargo, se enfrenta a varios desafíos. En particular, la previsión de crecimiento del uso del hidrógeno en los Estados Unidos en el próximo lustro sugiere que la instalación de capacidad de generación de hidrógeno verde no competirá adecuadamente con las necesidades industriales. Esto podría impedir la consecución de los objetivos de reducción de emisiones.

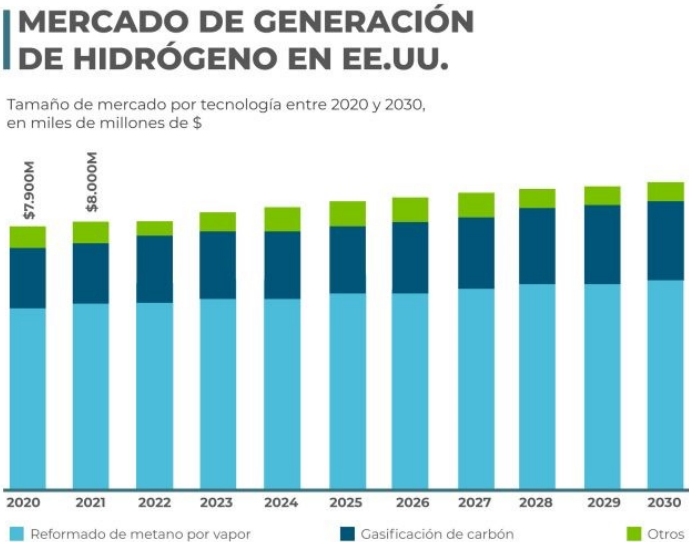


Ilustración 4: previsión del mercado del hidrógeno en EEUU.

Fuente: Gran View Research

1.3 EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

El hidrógeno no es un combustible, sino un vector energético, una forma de almacenar y transportar la energía.

El hidrógeno tiene la capacidad de ser almacenado en grandes cantidades y por largos periodos, una característica esencial para su utilización como fuente de energía a gran escala. Este potencial es especialmente relevante en el contexto de la regulación del consumo y la producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables. Los sistemas de electrólisis facilitan la evolución y mejora en la gestión de las redes eléctricas, proporcionando una solución efectiva para los desafíos asociados a la imprevisibilidad de las energías renovables.



Uno de los principales problemas de depender de la energía generada por renovables es su imprevisibilidad. Por ejemplo, un período de alta demanda eléctrica puede coincidir con un día sin viento o con cielos nublados, y viceversa. Esta variabilidad puede dificultar la estabilidad y la fiabilidad del suministro eléctrico.

El almacenamiento de hidrógeno puede mitigar estos problemas al actuar como un medio de almacenamiento de energía a largo plazo. Durante los períodos de exceso de producción de energía renovable, la electricidad puede utilizarse para producir hidrógeno mediante electrólisis. Este hidrógeno puede almacenarse y luego utilizarse para generar electricidad cuando la producción de energía renovable es insuficiente para satisfacer la demanda.

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno ofrecen una solución viable para equilibrar la oferta y la demanda de energía, mejorando así la estabilidad de las redes eléctricas. La capacidad de almacenar energía en forma de hidrógeno permite una mayor flexibilidad en la gestión de la producción y el consumo de energía.

Además, los sistemas de almacenamiento de hidrógeno pueden complementar o sustituir a los grupos electrógenos que actualmente se utilizan para generar energía a partir de gas o diesel. Este cambio no solo reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también mejoraría la eficiencia energética.

Otro beneficio significativo del hidrógeno es su alta densidad energética. Comparado con los sistemas de batería tradicionales, el hidrógeno ocupa menos espacio para la misma cantidad de energía almacenada. Esto hace que sea una opción atractiva para aplicaciones donde el espacio es un factor crítico.

1.4 LA CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO ENERGÉTICO

La cadena de valor del hidrógeno abarca tres fases fundamentales en su vida industrial: producción, distribución y/o almacenamiento, y aplicación o uso final. En los últimos años, el hidrógeno ha experimentado un crecimiento sin precedentes, captando la atención del sector industrial, instituciones gubernamentales y medios de comunicación. Este artículo explora el papel crucial del hidrógeno en la transición hacia una economía más sostenible, con un enfoque particular en el hidrógeno verde y la estrategia de la Unión Europea para alcanzar la neutralidad climática.

La Comisión Europea ha establecido una 'Hoja de Ruta del Hidrógeno' como parte de su estrategia para la integración del sistema energético. Esta hoja de ruta destaca la importancia del hidrógeno verde en la consecución de la neutralidad climática para el año 2050. Los gobiernos europeos están redirigiendo sus esfuerzos hacia la implementación de una cadena de valor del hidrógeno que reduzca significativamente las emisiones de gases contaminantes.

La fase de producción de hidrógeno es el foco principal de la inversión en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Los esfuerzos se centran en el desarrollo de tecnologías más eficientes y económicas para la producción de

Título del Proyecto: “Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España”.Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

hidrógeno verde, así como en la mejora de la infraestructura necesaria para su distribución y almacenamiento a gran escala.

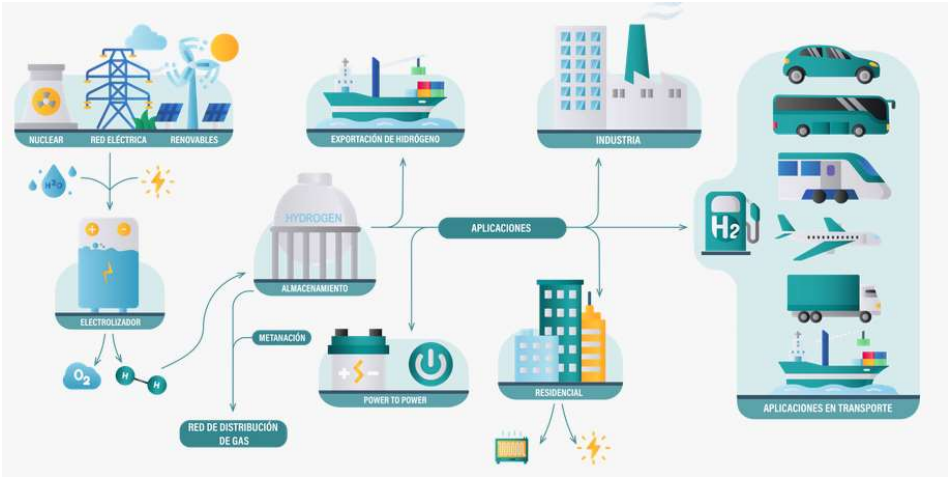


Ilustración 5: cadena de valor del hidrógeno

1.5ALMACENAMIENTO

El hidrogeno presenta una gran cantidad de energía por unidad de masa, como se puede ver en la siguiente gráfica:

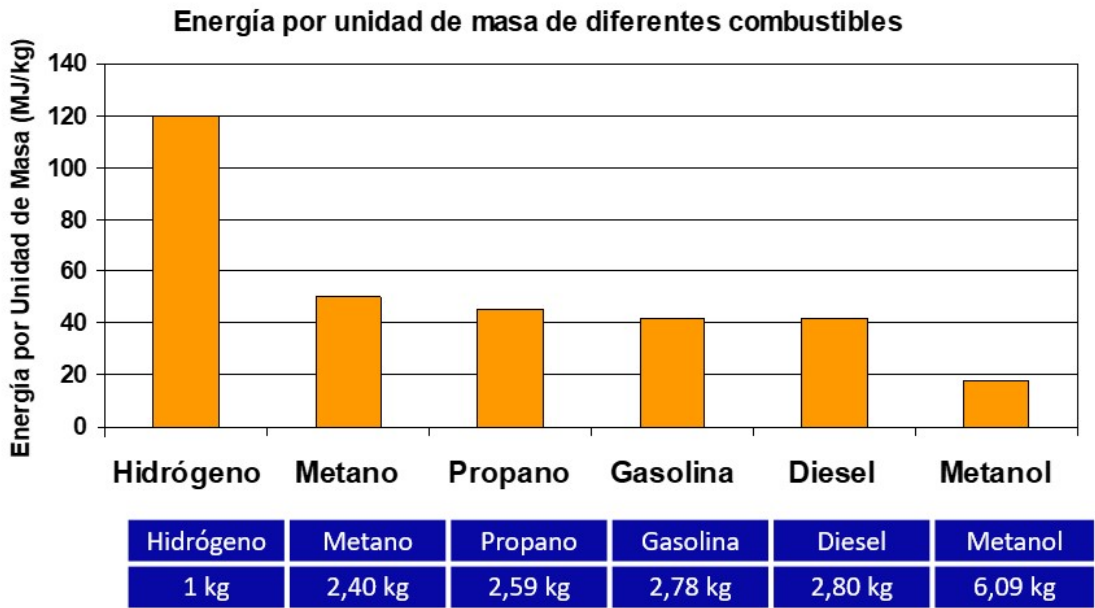


Ilustración 6: energía por unidad de masa de diferentes combustibles.

Sin embargo, su baja densidad energética en condiciones atmosféricas, hace necesario su almacenamiento mediante métodos o técnicas que se pueden ordenar según su estado de presentación (gas, líquido, o solido).

1.5.1HIDRÓGENO GAS

El hidrógeno a temperatura ambiente se encuentra en estado gaseoso. Debido a su baja densidad energética por unidad de volumen ($12\text{MJ}/\text{Nm}^3$), el hidrógeno gas es normalmente almacenado bajo altas presiones, en un rango entre 200-700 bar. En estos términos, se necesita el uso de contenedores a presión especialmente contruidos para este fin. Dichos contenedores son caros y, además, consumen energía en las aplicaciones a gran escala. El almacenamiento del hidrógeno en forma de gas comprimido tiene grandes retos en las áreas de relativamente baja densidad energética, coste del sistema, resistencia de impacto y empaquetamiento en vehículos.

Tanques de Materiales Compuestos

Para el almacenamiento en tanques hay 4 tipos de cilindros contenedores de alta presión. Los **Tipo I** son recipientes a presión fabricados en metal. El H_2 que se utiliza como gas industrial se almacena en depósitos de tipo I, cuya presión oscila entre los 150 y los 300 bares. Son los depósitos de alta presión más extendidos en la actualidad y los más baratos, pero su uso es inviable en vehículos por su elevado peso. Los **Tipo II** son recipientes a presión fabricados con un aro de revestimiento metálico grueso envuelto con un compuesto de fibra de carbono o vidrio. Se utilizan como depósitos de alta presión en hidrogeneras, ya que pueden soportar hasta 1000 bares.

Los tanques **Tipo III** son recipientes a presión formados por un revestimiento (liner) metálico interno, para evitar las fugas de hidrógeno por difusión, totalmente envuelto por materiales compuestos, que soportan los esfuerzos mecánicos. La eliminación de paredes gruesas metálicas y el mayor uso de materiales compuestos hacen que disminuya su peso en comparación con los tipos I y II. Los **Tipo IV**, Figura 2, son recipientes a presión fabricados con una camisa polimérica de alta densidad, que actúa como barrera de difusión de gas, totalmente envuelta con un compuesto de fibra de carbono. Estos tanques mantienen las válvulas metálicas para llevar a cabo la recarga y suministro de hidrógeno. Soportan presiones de hasta 700 bar. Los recipientes de tipo III y IV están pensados para aplicaciones portátiles, para las que el ahorro de peso es esencial, y que necesitan presiones entre 350 y 700 bar. Sin embargo, estos recipientes son mucho más caros debido al uso de fibra de carbono.

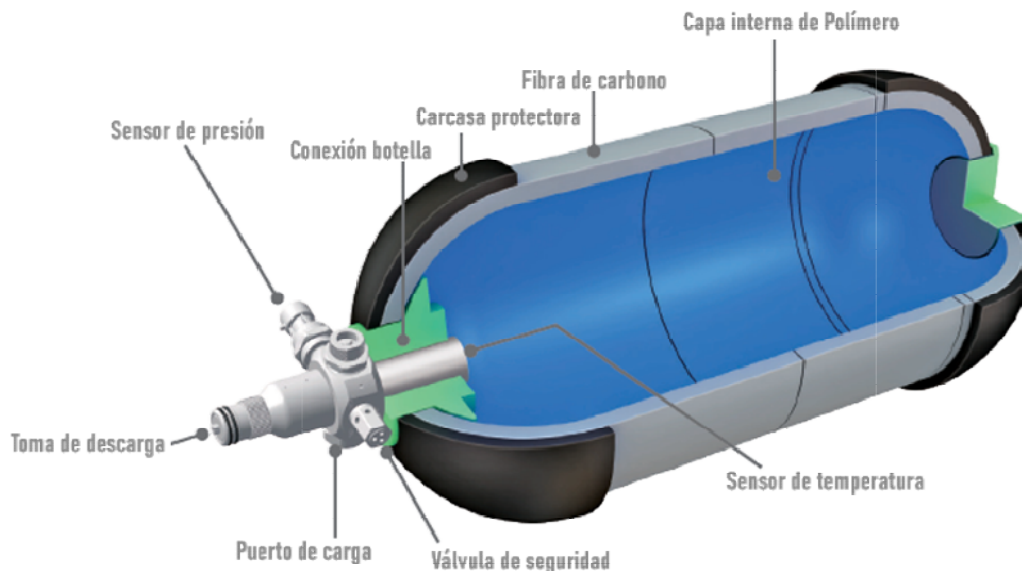


Ilustración 7: tanque de almacenamiento de hidrógeno tipo IV

1.5.2 HIDRÓGENO LÍQUIDO,

Además de la compresión, la densidad del hidrógeno puro también se puede aumentar a través de su licuefacción (condensación), convirtiendo el hidrógeno gaseoso en hidrógeno líquido (LH_2). La licuefacción es el proceso de pasar un gas a líquido por medio de modificar sus condiciones de presión y temperatura. Para ello se requieren temperaturas criogénicas, debido a que el punto de ebullición del hidrógeno a una atmósfera de presión es de $-252.8\text{ }^\circ\text{C}$. El proceso de licuefacción utiliza una combinación de compresores, intercambiadores de calor y válvulas de expansión para lograr el enfriamiento necesario.

Una vez licuado el hidrógeno, es esencial que pueda almacenarse de forma que se minimice la evaporación. La evaporación del hidrógeno líquido constituye, no solo una pérdida de la energía gastada en licuar el hidrógeno, sino también, a la larga, una pérdida de hidrógeno, ya que el gas evaporado debe ser ventilado debido a la presión que se acumula en el interior del recipiente de almacenamiento. Esta pérdida de hidrógeno almacenado a lo largo del tiempo se conoce como boil-off y se presenta como el porcentaje de hidrógeno almacenado que se pierde por día: la tasa de boil-off. La transferencia de calor del entorno al hidrógeno líquido almacenado y, por tanto, la tasa de boil-off se reducen al minimizar la relación superficie-volumen de los depósitos haciéndolos esféricos.

Vasos Dewar: Tecnología de Almacenamiento Convencional

Los vasos Dewar, comúnmente utilizados en termos de café, son estructuras empleadas para el almacenamiento de hidrógeno líquido. Aunque son una opción establecida, el proceso de licuefacción del hidrógeno es costoso y aproximadamente entre el 30% y el 40% de la energía se pierde durante este proceso. A pesar de estas limitaciones, se ha demostrado su viabilidad comercial en aplicaciones como la propulsión de vehículos, como ejemplifica el caso de BMW. Además, su alta densidad energética lo convierte en una opción prometedora para futuras aplicaciones en la aviación, donde la eficiencia de masa por volumen es crucial.

Disoluciones de Borohidruros y Líquidos Orgánicos

Otra alternativa para el almacenamiento de hidrógeno líquido implica el uso de disoluciones de borohidruros o líquidos orgánicos, como el tolueno (C_7H_8) o el metilciclohexano (C_7H_{14}). En este enfoque, el hidrógeno se libera mediante una reacción de hidrólisis catalítica. Aunque esta tecnología está aún en fase de desarrollo, ofrece perspectivas interesantes para superar las limitaciones de coste y eficiencia asociadas con los métodos convencionales de almacenamiento de hidrógeno líquido.

1.5.3 ALMACENAMIENTO EN MATERIALES SÓLIDOS.

Pasamos en este punto a tratar los métodos de almacenamiento basados en materiales. Estos se pueden clasificar en almacenamiento por adsorción en la superficie de los sólidos, sostenido por enlaces físicos de van der Waals relativamente débiles, o almacenamiento mediante absorción de hidrógeno atómico dentro de los mismos.

El hidrógeno puede adsorberse de forma reversible en la superficie de los sólidos porosos, tanto en forma molecular como atómica. El almacenamiento de hidrógeno mediante adsorción aprovecha los enlaces físicos de Van der Waals entre el hidrógeno molecular y un material con gran superficie específica. Debido a la debilidad del enlace de Van der Waals, normalmente se deben aplicar bajas temperaturas y presiones elevadas para lograr densidades de almacenamiento de hidrógeno significativas mediante adsorción. Uno de los retos más importantes de esta tecnología es la gestión del calor, siendo el nitrógeno líquido el refrigerante más común utilizado en este proceso. La presión aplicada suele ser de 10 a 100 bares, pero varía según el adsorbente y la aplicación prevista. El uso de presiones más altas no es ventajoso más allá de un cierto umbral, ya que la presencia del adsorbente puede dejar de mejorar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en comparación con si el gas presurizado se almacenará en el mismo recipiente, debido al espacio ocupado por el adsorbente.

Título del Proyecto: “Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España”. Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

Se han propuesto muchos adsorbentes para el almacenamiento de hidrógeno, tales como materiales porosos basados en carbono, estructuras metal-orgánicas, zeolitas, etc. En contraste con el almacenamiento de CH_4 o LH_2 , hay poca experiencia en la aplicación de esta tecnología y la mayoría de los recipientes desarrollados basados en la adsorción solo se han diseñado a escala de laboratorio.

En cuanto al almacenamiento mediante absorción se puede llevar a cabo mediante portadores de hidrógeno orgánico líquido, hidruros metálicos, hidruros complejos o hidruros químicos.

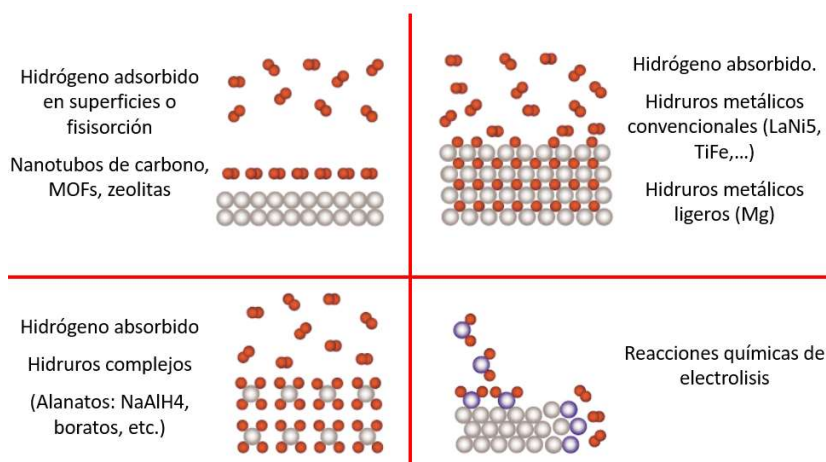


Ilustración 8: funcionamiento almacenamiento en hidruros metálicos

Por último, en la gráfica que se muestra a continuación, se puede ver una comparativa por unidad de volumen entre diferentes combustibles y algunos métodos de almacenamiento de hidrógeno.

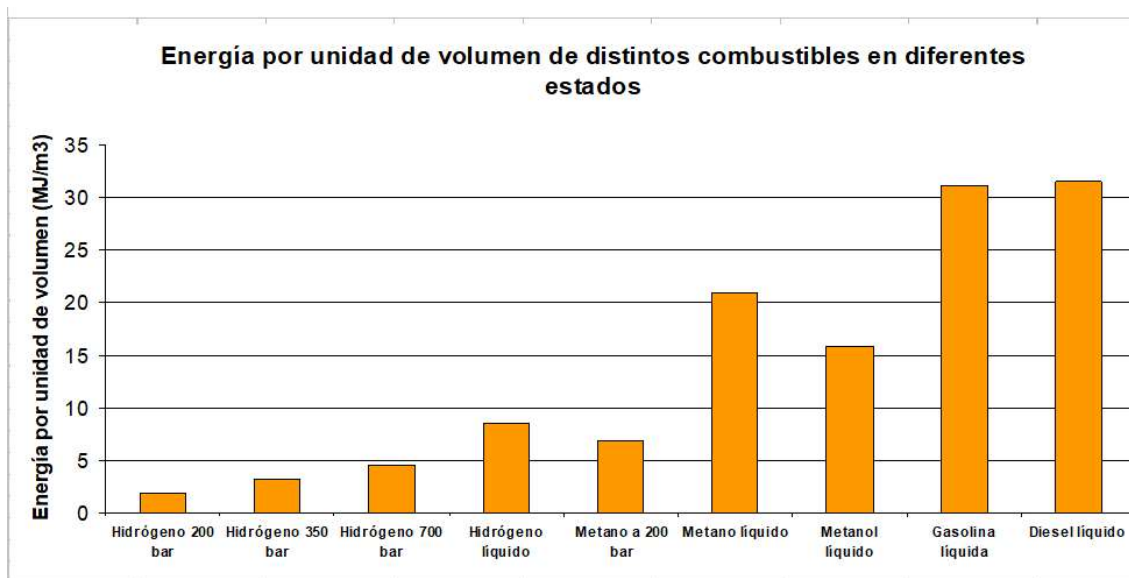


Ilustración 9: diferentes combustibles y su comparativa por unidad de volumen frente a los métodos de almacenamiento de hidrógeno más comunes

1.6 DISTRIBUCIÓN

Con frecuencia el hidrógeno se produce para ser consumido in situ, como en el caso de las refinerías o la industria metalúrgica. En el caso de que el hidrógeno se genere a cierta distancia de la zona de aplicación final, entra en juego la logística del transporte.

1.6.1 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO

Los sistemas de distribución de hidrógeno empleados en la actualidad abarcan una variedad de métodos para transportar este recurso desde los puntos de producción hasta los puntos de consumo. Aquí se describen los principales sistemas utilizados:

1. Gaseoductos:

Los gaseoductos son infraestructuras diseñadas para transportar hidrógeno en forma gaseosa a largas distancias. Funcionan de manera similar a los gaseoductos utilizados para transportar gas natural. El hidrógeno se comprime y se bombea a través de tuberías de alta resistencia que pueden recorrer cientos o incluso miles de kilómetros. Los gaseoductos son eficientes para el transporte a larga distancia y son ideales para conectar centros de producción con centros de consumo.

2. Transporte por Carretera en Gas:

El hidrógeno comprimido también puede ser transportado por carretera en camiones especializados diseñados para el transporte de gas. Estos camiones están equipados con tanques de almacenamiento de alta presión y sistemas de seguridad para garantizar un transporte seguro. Esta opción es adecuada para distancias más cortas y para la entrega directa a consumidores específicos o estaciones de recarga de hidrógeno.

3. Transporte por Carretera en Líquido:

El hidrógeno líquido puede ser transportado en camiones criogénicos a temperaturas muy bajas y a presiones atmosféricas. El hidrógeno líquido tiene una densidad de energía mucho mayor que el hidrógeno en estado gaseoso, lo que lo hace más eficiente para el transporte a larga distancia. Sin embargo, se requieren instalaciones criogénicas tanto en los puntos de origen como en los puntos de destino para mantener el hidrógeno a temperaturas criogénicas.

4. Transporte Marítimo:

El transporte marítimo de hidrógeno aún está en una etapa experimental, pero se están llevando a cabo investigaciones y proyectos piloto para evaluar su viabilidad. Se están explorando diferentes métodos, como el transporte en barcos criogénicos o en forma de compuestos químicos seguros para el transporte. El transporte marítimo podría ser una opción para el suministro de hidrógeno a áreas geográficamente remotas o para el comercio internacional.

1.6.2 ENERGY CARRIERS

El hidrógeno verde desempeñará un papel fundamental en la transición energética hacia una economía ecológica. Es uno de los carriers de energía más prometedores y también se aplica en una gran diversidad de industrias en todo el mundo.

Comparado con los combustibles fósiles, como ya hemos comentado, el hidrógeno tiene una menor densidad energética volumétrica, lo que requiere un mayor volumen de almacenamiento para proporcionar la misma cantidad de energía. Para abordar este problema, se están explorando alternativas como el metanol y el amoníaco como

portadores de hidrógeno. Estos compuestos ofrecen una mayor densidad energética y, por lo tanto, una mayor eficiencia de almacenamiento.

El metanol, en particular, presenta ventajas económicas significativas para el transporte transoceánico de hidrógeno, especialmente debido a la infraestructura existente para su manipulación y distribución. Sin embargo, tanto el metanol como el amoníaco tienen inconvenientes importantes, como su toxicidad, que deben abordarse para garantizar su seguridad en el manejo y transporte.

Además existents los portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHCs), estos son compuestos orgánicos que pueden absorber y liberar hidrógeno mediante procesos reversibles de hidrogenación y deshidrogenación. La hidrogenación es un tipo de reacción química cuyo resultado final es la adición de hidrógeno a otro compuesto. El hecho de que tanto las formas hidrogenadas como deshidrogenadas de los LOHCs sean líquidas en condiciones ambiente es ventajoso ya que no hay necesidad de producir, capturar o almacenar CO₂ o N₂, y el hidrógeno obtenido tras la deshidrogenación es relativamente puro. Por tanto, los LOHCs permiten el almacenamiento de hidrógeno a presión y temperatura normales.

El proceso, resumido en la siguiente figura, consiste en añadir hidrógeno a la sustancia portadora en el punto de origen, mientras se enfría y se presuriza ligeramente, y con ello, se convierte en otra sustancia. Esta nueva sustancia es la que se transporta hasta el punto de destino (en camiones cisterna, barcos...). En el lugar en el que se va a usar, se calienta mientras se le reduce ligeramente la presión. Como resultado se desprende el hidrógeno, convirtiéndose de nuevo en la sustancia inicial, que se puede llevar al lugar de origen para iniciar de nuevo el proceso. Esta tecnología podría beneficiarse de la infraestructura existente, ya que se pueden usar tanques estándar en puertos y áreas industriales.

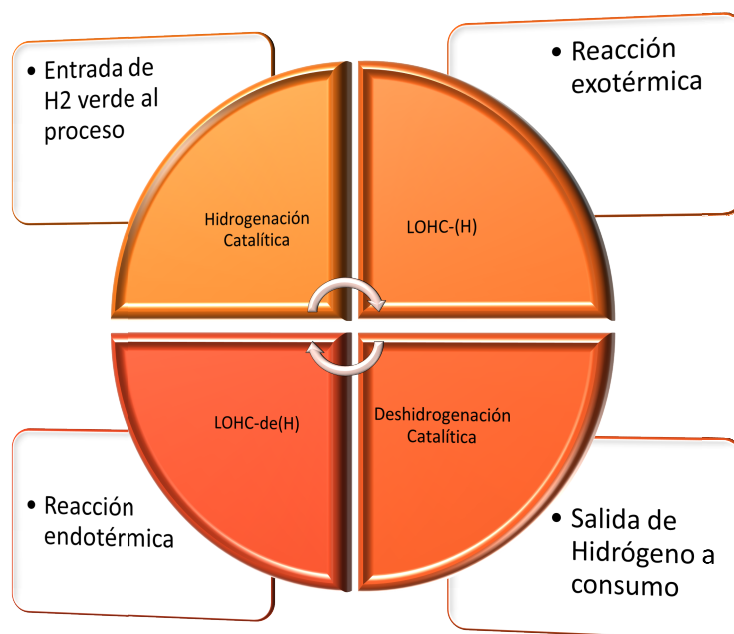


Ilustración 10: portadores de líquido orgánicos

En resumen, todos los portadores de hidrógeno tienen ventajas e inconvenientes que deben ser considerados cuidadosamente. La elección del portador de hidrógeno más adecuado dependerá de una variedad de factores, incluyendo la aplicación específica, la infraestructura disponible y las consideraciones de seguridad y medioambientales. Es crucial evaluar todas las opciones de manera integral para avanzar hacia un futuro energético más sostenible y seguro.

Título del Proyecto: "Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España". Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

A pesar de que el metanol y el ácido fórmico son orgánicos y líquidos, no se consideran LOHCs según esta definición, ya que su deshidrogenación solo da lugar a productos gaseosos.

1.7 ESTACIONES DE SERVICIO DE HIDRÓGENO

El funcionamiento de una hidrogenera o hidrolinera (si carece de producción de hidrógeno in situ) es muy similar al de una estación de servicio convencional de gasolina o diesel.



Ilustración 11: repostado de un vehículo de hidrógeno

1. Producción de Hidrógeno:

La mayoría de las estaciones de servicio de hidrógeno obtienen su hidrógeno mediante la electrólisis del agua o mediante la reformación de gas natural. En la electrólisis del agua, se aplica electricidad al agua (H_2O) para dividirla en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). En la reformación de gas natural, el gas natural se descompone térmicamente para producir hidrógeno. En ambos casos, el hidrógeno producido se purifica y comprime para su almacenamiento y distribución.

2. Almacenamiento:

El hidrógeno producido se almacena en tanques de almacenamiento a alta presión. Estos tanques están diseñados para mantener el hidrógeno comprimido de manera segura hasta que se necesite para el repostaje de vehículos.

3. Compresión:

El hidrógeno almacenado se comprime aún más para aumentar su densidad y permitir un llenado rápido de los tanques de combustible de los vehículos. La compresión del hidrógeno se realiza típicamente mediante compresores especiales que pueden elevar la presión del hidrógeno a varios cientos de bares.

Título del Proyecto: “Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España”.Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

4. Dispensación:

Cuando un vehículo de hidrógeno se acerca a la estación de servicio, el conductor puede conectar la boquilla de llenado del vehículo a la boquilla de llenado de la estación de servicio. Se establece una conexión segura y se inicia el flujo de hidrógeno hacia el tanque de combustible del vehículo. La cantidad de hidrógeno dispensado se controla y se detiene automáticamente una vez que el tanque de combustible del vehículo está lleno.

5. Seguridad:

Las estaciones de servicio de hidrógeno están equipadas con sistemas de seguridad avanzados para garantizar un manejo seguro del hidrógeno. Esto incluye sistemas de detección de fugas, sistemas de ventilación para eliminar el hidrógeno liberado y sistemas de emergencia para controlar cualquier situación peligrosa.

6. Monitorización y Mantenimiento:

Las estaciones de servicio de hidrógeno están equipadas con sistemas de monitorización y control que supervisan continuamente el funcionamiento de la estación y la calidad del hidrógeno dispensado. Además, se lleva a cabo un mantenimiento regular para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de la estación.

Según el mapa de planificación de la red Ibérica de hidrogeneras elaborado por GASNAM, España cuenta actualmente con 11 hidrogeneras en activo. Además, hay 12 estaciones de repostaje de hidrógeno, (2 abiertas al público, 7 privadas y 3 en construcción en la península ibérica)

.Te mostramos un listado con las hidrogeneras de uso público.

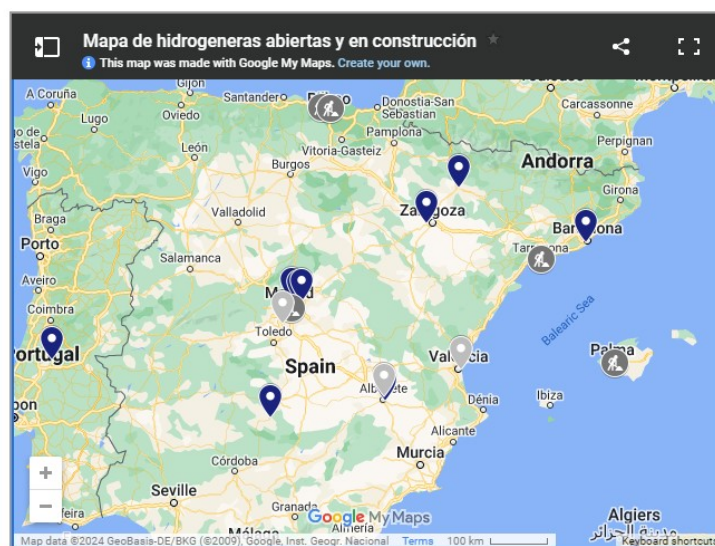


Ilustración 12: mapa hidrogeneras en España (GASNAM)

1.8 USOS DEL HIDRÓGENO

1.8.1 LA PILA DE COMBUSTIBLE.

Las PILAS DE COMBUSTIBLES son dispositivos electroquímicos que convierten directamente la energía química del combustible en energía eléctrica. Al no estar limitadas por el ciclo térmico de Carnot, la eficiencia de estos dispositivos es MAYOR.

Título del Proyecto: "Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España". Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

Una pila de combustible de hidrógeno es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química almacenada en el hidrógeno y el oxígeno en energía eléctrica y calor, sin producir emisiones contaminantes. Aquí se explica detalladamente cómo funciona:

1. Alimentación de Hidrógeno:

En el lado del ánodo de la pila de combustible, se suministra hidrógeno (H_2) como combustible. El hidrógeno puede provenir de tanques de almacenamiento de hidrógeno a alta presión o de otros sistemas de suministro de hidrógeno.

2. Separación de Electrones y Protones:

Cuando el hidrógeno ingresa al ánodo, se divide en protones (H^+) y electrones (e^-). Los protones atraviesan la membrana de intercambio de protones (PEM), que es una membrana polimérica conductor de protones, mientras que los electrones siguen un camino externo para crear una corriente eléctrica.

3. Reacción con el Oxígeno:

En el lado del cátodo, se suministra oxígeno (O_2) del aire circundante. Los protones que atraviesan la membrana de intercambio de protones se combinan con el oxígeno y los electrones que regresan del circuito externo para formar agua (H_2O) como único subproducto.

4. Generación de Electricidad:

El flujo de electrones a través del circuito externo crea una corriente eléctrica que se puede utilizar para alimentar motores eléctricos, baterías o cualquier otro dispositivo eléctrico. Esta corriente eléctrica alimenta el vehículo o el sistema en el que se integra la pila de combustible.

5. Liberación de Calor:

La reacción química que ocurre en la pila de combustible también genera calor como subproducto. Este calor puede ser utilizado para calentar el vehículo o puede ser disipado a través de un sistema de refrigeración.

6. Eficiencia y Limpieza:

Una de las ventajas principales de las pilas de combustible de hidrógeno es su alta eficiencia energética y la producción de energía limpia, ya que el único subproducto es agua. Además, las pilas de combustible son modulares, lo que significa que se pueden apilar para aumentar la potencia según sea necesario.

La siguiente imagen muestra una pila de combustible genérica y su funcionamiento.

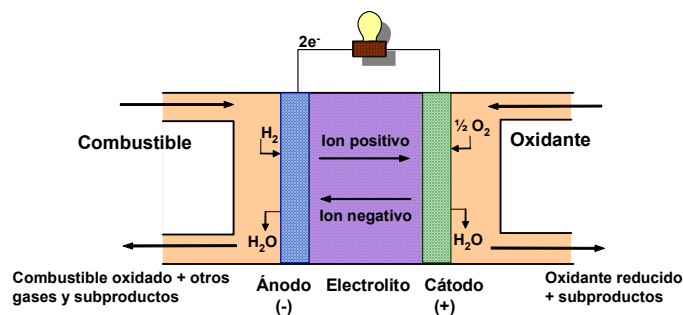


Ilustración 13: funcionamiento de una pila de combustible

Título del Proyecto: "Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España". Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

Existen multitud de tipos de pila de combustible a continuación se listan los más significativos, explicando de forma breve su funcionamiento y sus aplicaciones principales.

Pila de Combustible de Membrana de Electrolito Polimérico (PEMFC):

Funcionamiento: En este tipo de pila de combustible, el electrolito es una membrana de intercambio de protones (PEM), generalmente de material polimérico. El hidrógeno se divide en protones y electrones en el ánodo, y los protones pasan a través de la membrana PEM hacia el cátodo, mientras que los electrones viajan a través de un circuito externo, generando electricidad. En el cátodo, los protones se combinan con oxígeno y electrones para formar agua.

Aplicaciones: Las PEMFC son el tipo de pila más común y esto incluye las en aplicaciones de vehículos de hidrógeno y sistemas de energía portátiles debido a su rápida respuesta y alta densidad de potencia.

Pila de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC):

Funcionamiento: En este tipo de pila de combustible, el electrolito es un ácido fosfórico concentrado en un soporte de carbón. La reacción de oxidación del hidrógeno tiene lugar en presencia de un catalizador de platino y produce agua y energía eléctrica.

Aplicaciones: Las PAFC son adecuadas para aplicaciones estacionarias, como sistemas de cogeneración y generadores de energía distribuida.

Pila de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC):

Funcionamiento: En este tipo de pila de combustible, el electrolito es una mezcla fundida de carbonato de litio y potasio. El hidrógeno se convierte en iones hidróxido y electrones en el ánodo. Los iones hidróxido se transportan a través del electrolito al cátodo, donde reaccionan con oxígeno y electrones para formar agua.

Aplicaciones: Las MCFC son adecuadas para aplicaciones estacionarias de generación de energía de gran escala debido a su alta eficiencia y capacidad de utilizar combustibles con bajo contenido de hidrógeno.

Pila de Combustible de Óxido Sólido (SOFC):

Funcionamiento: En este tipo de pila de combustible, el electrolito es un material cerámico conductor de oxígeno, como el óxido de circonio estabilizado con itrio. Los iones de oxígeno viajan a través del electrolito desde el cátodo al ánodo, donde se produce la reacción de oxidación del hidrógeno. Los electrones generados en el ánodo viajan a través de un circuito externo hacia el cátodo, donde se combinan con oxígeno y iones de oxígeno para formar oxígeno ionizado.

Aplicaciones: Las SOFC son adecuadas para aplicaciones estacionarias y de gran escala, como plantas de energía y sistemas de cogeneración.

Pila de Combustible de Metanol Directo (DMFC):

Funcionamiento: En este tipo de pila de combustible, el metanol se oxida directamente en el ánodo para producir protones, electrones y dióxido de carbono. Los protones pasan a través de una membrana de intercambio de protones hacia el cátodo, donde se combinan con oxígeno y electrones para formar agua.

Aplicaciones: Las DMFC son adecuadas para aplicaciones portátiles y pequeñas, como dispositivos electrónicos portátiles y cargadores de teléfonos móviles

Título del Proyecto: “Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España”. Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolito	Membrana de Polímero Sólido	Solución Alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos Fundidos	Óxido Sólido	Membrana de Polímero Sólido
Temperatura Operación (°C)	60 - 80	100 - 120	200 - 250	600 - 700	800 - 1000	50 - 120
Rango potencia	5 - 250 kW	5 - 150 kW	50 kW - 11 MW	100 kW - 2 MW	100 - 250 kW	5 kW
Ventajas	Baja Temperatura Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H ₂ impuro	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
Aplicaciones	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Portátiles

Ilustración 14: tabla resumen tipos de pila de combustible

1.8.2 APLICACIONES MÓVILES

En el ámbito de las pequeñas aplicaciones, las estaciones de energía portátil equipadas con pilas de combustible son una solución conveniente para actividades al aire libre, viajes y emergencias. Estas estaciones portátiles pueden cargar dispositivos electrónicos, como teléfonos móviles, tabletas y computadoras portátiles, ofreciendo una fuente de energía confiable y sostenible dondequiera que se necesite.

Los drones son otra aplicación móvil emergente para la tecnología de la pila de combustible. Alimentar drones con pilas de combustible puede aumentar significativamente su autonomía de vuelo en comparación con las baterías convencionales. Esto es especialmente beneficioso para aplicaciones comerciales y de vigilancia que requieren vuelos prolongados y distancias largas sin la necesidad de recargar o cambiar las baterías.

En el sector del transporte, los vehículos con pila de combustible, como coches, camiones y autobuses, están revolucionando la movilidad sostenible. Los coches de hidrógeno ofrecen una alternativa limpia a los vehículos de combustión interna, con cero emisiones de gases de escape y tiempos de recarga comparables a los de los vehículos de combustión convencionales. Además, los camiones y autobuses con pilas de combustible pueden proporcionar una solución viable para el transporte de carga y pasajeros a larga distancia, reduciendo las emisiones de carbono y mejorando la calidad del aire en entornos urbanos.

1.8.3 APLICACIONES ESTACIONARIAS

Las aplicaciones estacionarias de las pilas de combustible ofrecen soluciones eficientes y sostenibles para una variedad de necesidades energéticas en entornos fijos. Una de estas aplicaciones es su utilización como suministro de energía en instalaciones aisladas, como estaciones meteorológicas remotas, faros costeros y refugios de montaña. Las pilas de combustible proporcionan una fuente de energía confiable y limpia en ubicaciones donde el acceso a la red eléctrica es limitado o costoso, reduciendo la dependencia de generadores diésel y minimizando las emisiones de gases de efecto invernadero.

Otra aplicación estacionaria de las pilas de combustible es su implementación en pilas de gran tamaño conectadas a la red eléctrica. Estas instalaciones pueden funcionar como sistemas de energía distribuida, proporcionando electricidad a comunidades, edificios comerciales e industriales. Las pilas de combustible pueden operar de manera eficiente y silenciosa, ofreciendo una alternativa limpia y confiable a las fuentes de energía convencionales, y contribuyendo a la estabilidad y resiliencia de la red eléctrica.

Las pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) también se utilizan en aplicaciones estacionarias, como sistemas de calefacción urbana o districtheating. Estos sistemas utilizan pilas de combustible SOFC para generar electricidad y calor de manera simultánea, aprovechando el calor residual del proceso de generación eléctrica para calentar

Título del Proyecto: "Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España". Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera: CER-20211002

agua o aire y distribuirlo a través de una red de calefacción urbana. Esta integración de energía eléctrica y térmica mejora la eficiencia global del sistema y reduce las emisiones de carbono.

Finalmente, las pilas de combustible se utilizan como sistemas de backup en sistemas críticos de almacenamiento de datos, como centros de datos y telecomunicaciones. Estos sistemas proporcionan una fuente de energía confiable y limpia para respaldar las operaciones en caso de cortes de energía eléctrica, garantizando la continuidad del servicio y protegiendo la integridad de los datos almacenados. Las pilas de combustible ofrecen tiempos de arranque rápidos y una operación silenciosa, lo que las hace ideales para aplicaciones donde se requiere una energía de respaldo sin interrupciones.