

HIDRÓGENO EN CELDA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEMFC): Una Revisión

HYDROGEN IN A POLYMERIC MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC): A Review

Márquez Keyla¹, Weinhold Elgis², Márquez Olga², Ortiz Reynaldo², Márquez Jairo^{2*}.

¹Facultad de Ingeniería Núcleo Universitario Alberto Adriani, ULA, Mérida.

²Laboratorio de Electroquímica, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, ULA. Mérida 5101, Venezuela.

jokkmarquez82@gmail.com

Recibido: 05-09-2023

Aceptado: 17-11-2023

Resumen

La incorporación del vector hidrógeno en celdas de combustible, para suministro posterior y cuando sea requerida la energía, y con ausencia de contaminantes ambientales, ha sido un tópico de mucho estudio estos últimos años. Luego de esas numerosas investigaciones, se llega a considerar al dúo H₂-PEMFC como la pareja apropiada para tales fines. Son numerosas las aplicaciones económico-sociales que se han logrado y esperan lograr en el futuro próximo. Entre las diferentes alternativas estudiadas para el suministro de hidrógeno a la Pila, acá se tratan, el suministro de hidrógeno líquido vehicular, el llenado vehicular con hidrógeno verde y azul y el combustible vehicular hidrógeno desde vectores metanol y amoníaco. Aplicaciones varias son, desde equipos portátiles hasta grandes centrales de producción de energía estacionaria y en transporte y dispositivos móviles. Relativo al transporte, se han incorporado estas celdas de combustible en automóviles, buses, locomotoras, buques, aeroplanos, motocicletas, vehículos de carga.

Palabras clave: Hidrógeno, Celdas de combustible, Membranas poliméricas.

Abstract

The incorporation of the hydrogen vector in fuel cells, for later supply and when energy is required, and with absence of environmental pollutants, has been a topic of much study in recent years. After these numerous investigations, the H₂-PEMFC duo has come to be considered as the appropriate couple for such purposes. Numerous economic-social applications have been achieved and are expected to be achieved in the near future. Among the different alternatives studied for the supply of hydrogen to the fuel cell, the supply of liquid hydrogen for vehicles, the filling of vehicles with green and blue hydrogen, and hydrogen vehicle fuel from methanol and ammonia vectors are discussed here. Applications range from portable equipment to large stationary power plants and in transportation and mobile devices. Regarding transportation, these fuel cells have been incorporated in automobiles, buses, locomotives, ships, airplanes, motorcycles, cargo vehicles.

Key words: Hydrogen, Fuel Cells, Polymeric membranes

Keyla Márquez: MSc. En Electroquímica fundamental y Aplicada (ULA), Ingeniero Industrial (IUPSM), miembro del personal docente y de investigación del NUAA de la ULA. E-mail: keylaenator@gmail.com.

Elgis Weinhold: Dra en Química Aplicada, opción Electroquímica Universidad de Los Andes (ULA), Licenciada en Química (ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA Mérida-Venezuela. Email: elkisweinhold@gmail.com.

Olga P. Márquez: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciada en Química (UCV-ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. E-mail: olgamq@ula.ve

Reynaldo Ortiz: Dr en Química Aplicada, opción Electroquímica (ULA), Lcdo. en Química (ULA), investigador de la Facultad de Ciencias-ULA Mérida-Venezuela. Email:reynaldoluis@gmail.com

Jairo Márquez P: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciado en Química (UCV-ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. E-mail: jamar@ula.ve

Introducción

Los requerimientos actuales a nivel mundial urgen por el acceso sin limitaciones al recurso energético no contaminante.^{1,2} Existe el requerimiento adicional, sumado a las energías renovables, del almacenamiento y de fuentes de suministro energético disponibles, permanentes, seguras, variadas, ilimitadas, accesibles, no contaminantes y económicas.³ El Hidrógeno cumple con buena parte de estas exigencias y ello explica la creciente actividad científico-técnica, relacionada con este recurso.⁴ Son variadas las vías de su síntesis, y su obtención, mediante síntesis químicas controladas y procesos del tipo electrolisis, fotoelectrólisis y fotoelectroquímico, se suman a esa actual exigencia de nula contaminación, simplicidad y economía en la síntesis.¹

Adicionalmente, La celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte directamente la energía química en energía eléctrica. Son variadas las celdas de combustible existentes y su aplicabilidad.^{3,4}

Uno de los usos más importantes del Hidrógeno para la generación de electricidad, es en las celdas de combustible (Hidrógeno + Oxígeno \rightarrow Energía + Agua). Con las celdas de combustible se espera la superación de serios problemas actuales como son: la escasez de combustible, contaminación y calentamiento global (efecto invernadero), y la excesiva centralización de la producción de la energía eléctrica.⁵ Se utiliza Hidrógeno puro como combustible y aire como oxidante y se evalúa el rendimiento global del sistema.

Amplios estudios realizados, destacan la importancia que representa el dúo, Hidrógeno – Pila PEM (arreglo de celdas de combustible de membranas de intercambio protónico), ello por su acertado acoplamiento en atención a requerimientos sociales e industriales que requieren del recurso energético, así, en la actualidad se procesan, atienden, resuelven y desarrollan, usos y aplicaciones de este dúo como, por ejemplo, en transporte, automoción, industria, comercio y sociedad.⁶ Existe ya una clasificación de hidrogeno multicolor,

dependiendo de su grado de contaminación en el proceso de síntesis (no contaminante, poco contaminante, contaminante).^{4,7}

En este estudio se tratarán en particular los Hidrógenos denominados verde y azul, en consideración a su nula o poca carbonización ambiental durante su síntesis y uso, y se tratará en particular, la aplicación del dúo H₂ – PEM en la automoción.

Hidrógeno

La humanidad busca actualmente un sistema energético fiable, asequible y no contaminante, y las energías renovables (Figura 1), sumadas a procesos de almacenamiento y suministro de estas energías, ocupan en la actualidad un papel preponderante con relación a ello, debido principalmente a su diversidad, abundancia, accesibilidad y potencial aprovechamiento en todo el planeta,⁸ estas son de muy poca o de nula contaminación, sin contribución al efecto invernadero y a la contaminación ambiental.

El desarrollo de energías limpias es imprescindible para la implementación del acceso mundial a la electricidad y paralelamente controlar el cambio climático y la contaminación ambiental, contribuyendo así al saneamiento del planeta.⁹ Los requerimientos actuales a nivel mundial, en los campos energético, económico, salud, comunicación, seguridad, ambiente, servicios y bienestar comunitario, urgen por el acceso sin limitaciones al recurso energético.^{4,5} Existe el requerimiento adicional, sumado a las energías renovables, de fuentes de suministro energético disponibles, permanentes, seguras, variadas, ilimitadas, accesibles, no contaminantes y económicas. De las fuentes disponibles al respecto, el Hidrógeno cumple con buena parte de estas exigencias y ello explica la creciente actividad científico-técnica, los nuevos desarrollos y nuevas aplicaciones de este recurso.

El Hidrógeno es considerado también un vector de almacenamiento energético,¹⁰ con novedosas aplicaciones, y su obtención, mediante síntesis químicas controladas y

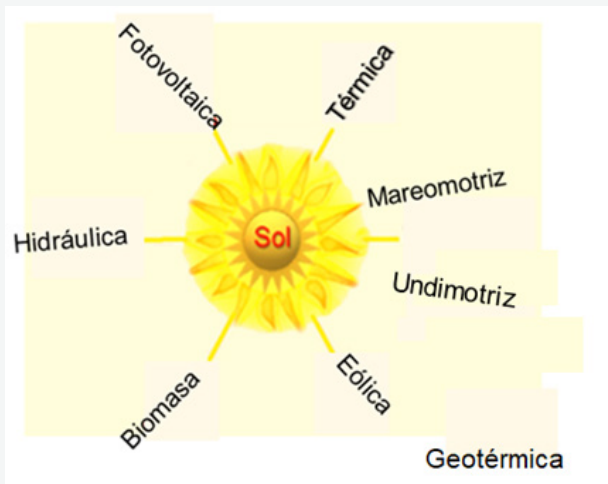


Figura 1.- Cuadro ilustrativo de Energías Renovables (ER)

procesos del tipo electrolisis, fotoelectrólisis o fotoelectroquímico, se suman a esa actual exigencia de nula contaminación, simplicidad y economía en la síntesis (Figura 2).

En cuanto a la descarbonización, efecto invernadero y contaminación ambiental, es necesario la atención a otras fuentes contaminantes ambientales. Hay emisiones de gases de efecto invernadero en el sector agrícola, pecuario, silvicultura y deforestación. Otros problemas de origen antrópicos debido al manejo inadecuado de recursos naturales son:

- (a) deforestación;
- (b) desertificación;
- (c) inundaciones;

- (d) contaminación hídrica, superficial o subterránea;
- (e) contaminación del aire;
- (f) recarga insuficiente de acuíferos;
- (g) impermeabilización de suelos;
- (h) contaminación en general (residuos radioactivos y otros contaminantes);
- (i) otros.

Las fuentes renovables de energía están bajo evaluación en diversas localidades para su incorporación en planes de descontaminación ambiental. La energía Solar, eólica e hidroeléctrica han sido de amplia aceptación y al respecto nos referimos, en forma resumida, a parte de esa interrelación. En la tabla I se indican rutas para la producción de Hidrógeno vía electroquímica.^{1,3} Mediante la electrolisis fotovoltaica, en medio acuoso, se obtienen Hidrógeno y oxígeno a partir del agua, la cual es restablecida posteriormente y con suministro de energía al medio, en celda de combustible.

La apuesta por el uso del H₂ como vector energético que permitiría mantener la capacidad de energía y transporte requerida actualmente por nuestras sociedades deberá resolver dificultades técnicas, económicas y sociales, puesto que el H₂, el gas más ligero de nuestra naturaleza, es un elemento cuyo manejo requiere tecnologías avanzadas y no está exento de ciertos riesgos en su uso cotidiano.

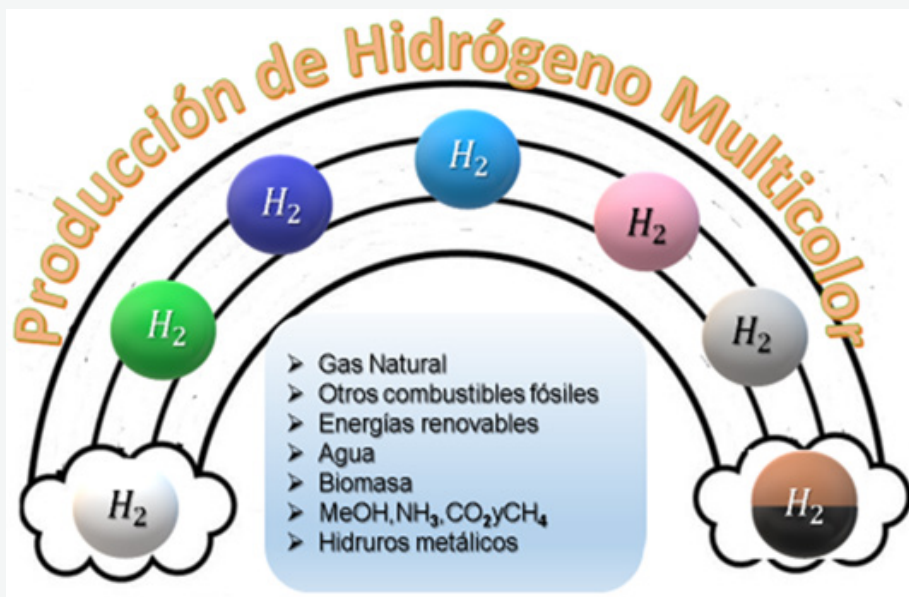


Figura 2.- Representación de la producción de Hidrógeno multicolor.

Tabla 1.- Producción de Hidrógeno (verde y/o azul), de la energía solar, vía Electroquímica

H ₂ de la energía solar directa (electrólisis fotovoltaica)
H ₂ en celda fotoelectroquímica
H ₂ de energía solar indirecta (electrólisis): eólica, hidroeléctrica, térmica, mareomotriz, etc.
H ₂ por electrólisis (otras fuentes de electricidad)
H ₂ vía producción de amoníaco “verde”
H ₂ vía producción de metanol “verde”
H ₂ procesos cíclicos con regeneración de los reaccionantes

Celda de combustible

La celda de combustible opera en forma similar a una batería y funciona en forma continua, mientras reciba un suministro continuo de combustible, produciendo energía en forma de electricidad y calor.

El combustible (Hidrógeno) alimenta al electrodo anódico y el oxígeno (o aire) al electrodo catódico. En presencia de un catalizador, el átomo de Hidrógeno se desdobra en sus componentes protón y electrón, los cuales se desplazan por vías diferentes al cátodo.

El protón que se forma en el ánodo, atraviesa el medio electrolítico entre electrodos, mientras que los electrones crean una corriente separada (energía) que

puede ser utilizada antes de su llegada al cátodo, donde se reunirán con el Hidrógeno y oxígeno en una molécula de agua¹¹ (figura 3). Son variadas las celdas de combustible existentes y su aplicabilidad¹² (Tabla 2).

Uno de los usos más importantes del Hidrógeno para la generación de electricidad, es en las celdas de combustible (Hidrógeno + Oxígeno → Energía + Agua). Con las celdas de combustible se espera la superación de serios problemas actuales como son: la escasez de combustible, contaminación y calentamiento global (efecto invernadero), y la excesiva centralización de la producción de la energía eléctrica.

Se utiliza Hidrógeno puro como combustible y aire como oxidante y se evalúa el rendimiento global del sistema.¹²⁻¹⁷

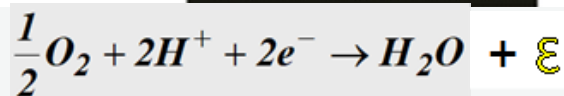
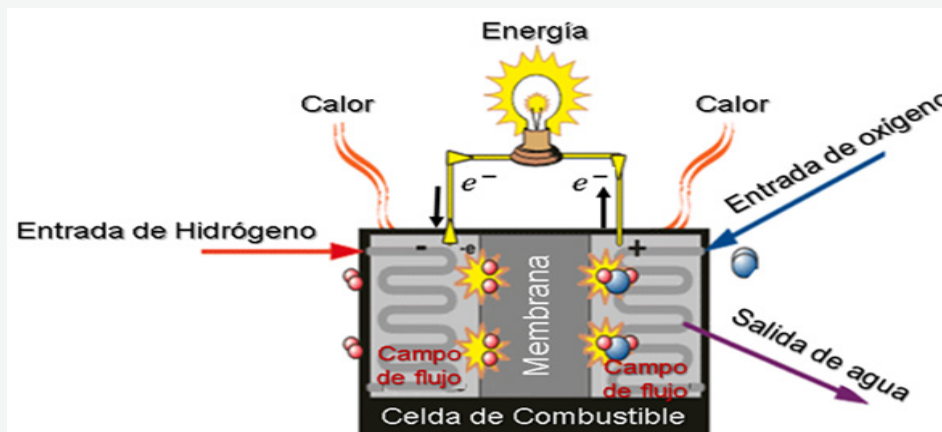


Figura 3.- Representación de una Celda de Combustible de Hidrógeno (Ref. 11)

Tabla 2.- Tipos de Celdas de Combustible y Características (Ref. 12)

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolito	Membrana de Polímero sólido	Solución alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos fundidos	Óxido sólido	Membrana de polímero sólido
Temperatura de operación (°C)	60-80	100-120	200-250	600-700	800-1000	50-120
Intervalo de Potencia	(5-250) kW	(5-150) kW	50 kW - 11MW	100 kW - 2 MW	100 kW -250 MW	5 kW
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Baja temperatura ➤ Arranque rápido ➤ Baja corrosión ➤ Mantenimiento bajo 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mayor eficiencia ➤ Rápida reacción catódica 	Acepta H ₂ impuro	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reformado interno ➤ Cogeneración 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reformado interno ➤ Cogeneración 	No necesita reformador de combustible
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transporte Portátiles ➤ Residencial 	Espaciales	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Portátiles

El Hidrógeno es ahora ampliamente reconocido como un vector energético flexible y respetuoso con el entorno, que supone un sistema de suministro energético seguro y, en particular con unas consecuencias significativas en el sector transporte, el Hidrógeno complementa a la electricidad con su gran capacidad de almacenamiento de energía y facilita la integración de la electricidad excedente generada en el mercado energético. La producción de Hidrógeno para uso industrial ya está ampliamente extendida, pero las pilas de combustible son las primeras candidatas para el desarrollo de nuevas oportunidades en su tecnología de aplicación. Por su elevada eficiencia y su silenciosa operación, estos convertidores de energía limpia son adaptables a un amplio rango de aplicaciones de consumo de energía, incluyendo diversos aparatos, así como aplicaciones al transporte por carretera, vía férrea, marítima y aérea.

Celda de combustible PEM (PEMFC)

Las pilas de combustible de tipo PEM se denominan así porque el electrolito está constituido por una membrana polimérica que separa la parte anódica y catódica de la celda (Barreras).^{15,18} Se trata de un conductor protónico, que permite el paso a través de él de los iones H⁺, pero con la particularidad de ser impermeable al resto

de sustancias. Un esquema simplificado del funcionamiento de una pila tipo PEM puede verse en la figura 4.² Básicamente, una celda está compuesta por tres zonas: un electrodo cargado negativamente (cátodo), un electrodo cargado positivamente (ánodo), y en medio la membrana electrolítica que separa físicamente los gases a ambos lados.

El combustible, en este caso Hidrógeno, es introducido por los canales mecanizados en la placa bipolar por el lado del ánodo y guiado a través de una capa difusora de material carbonoso hasta la capa catalítica, donde tiene lugar la reacción de oxidación del Hidrógeno (Ec.1). Para los electrodos, los materiales más comunes son aleaciones con Níquel, con Cobre, con Lantano, Itrio estabilizado con Zirconio (YSZ), dióxido de Cerio, Titanato dopado con Lantano y Estroncio, Circonio estabilizado con Escandio, Manganita dopado con Lantano y Estroncio, entre otros. La capa difusora debe ser un material altamente poroso, de modo que facilite la difusión del Hidrógeno para alcanzar más eficientemente las partículas de catalizador.

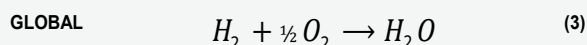
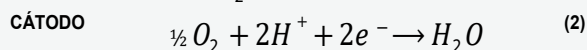
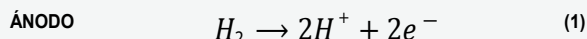
Los protones generados atraviesan la membrana polimérica de intercambio protónico, pero los electrones no pueden cruzarla, debido a que no es conductora electrónica y buscan la salida a través de un circuito alternativo: el formado por las

capas difusoras (que al ser de un material carbonoso conducen la electricidad) y las placas, creando una corriente eléctrica disponible para la REALIZACIÓN de un trabajo. Por la otra cara, el aire entra a través de los canales del cátodo, atraviesa la capa difusora y el oxígeno se combina en la capa catalítica con los protones que pasan a través de la membrana y los electrones del circuito exterior, generando agua y calor (Ec. 2).

Estos dos subproductos son evacuados a través del flujo de gases en el cátodo y, en el caso del calor, además por convección (natural o forzada) con el medio que rodea a la pila. En el caso de una configuración de varias monoceldas apiladas (lo que constituye realmente una pila), la circulación electrónica varía, ya que los electrones generados en el ánodo de una celda no se recombinan en la reacción catódica de la misma celda, sino en el cátodo de la celda adyacente.

Es el proceso continuo de generación y recombinación en celdas consecutivas lo que provoca una circulación electrónica global a través del sistema (19). Las reacciones electroquímicas descritas anteriormente

pueden formularse como:



Si empleamos la teoría electroquímica, para una pila de combustible de tipo PEM que emplee H_2/O_2 a $25^\circ C$, el potencial teórico que puede producir la misma será de 1,23 V, con una eficiencia del 83%. Sin embargo, el potencial real de una pila disminuye respecto de su valor teórico (ideal) debido a las pérdidas irreversibles que tienen lugar. La figura 5 nos presenta los elementos que componen la Celda PEM.⁸

El primer paso para diseñar una pila es definir el tamaño del área activa y el número de unidades que la formarán. En efecto, cuando un stock (arreglo) se diseña para una aplicación dada, los datos del diseño vienen impuestos por los requerimientos de la aplicación a la cual se va a entregar la energía eléctrica que se produzca, tales como el voltaje y la potencia. En el proceso de apilamiento en serie de las celdas, el voltaje total de la pila es la suma de todos los voltajes individuales, o el producto

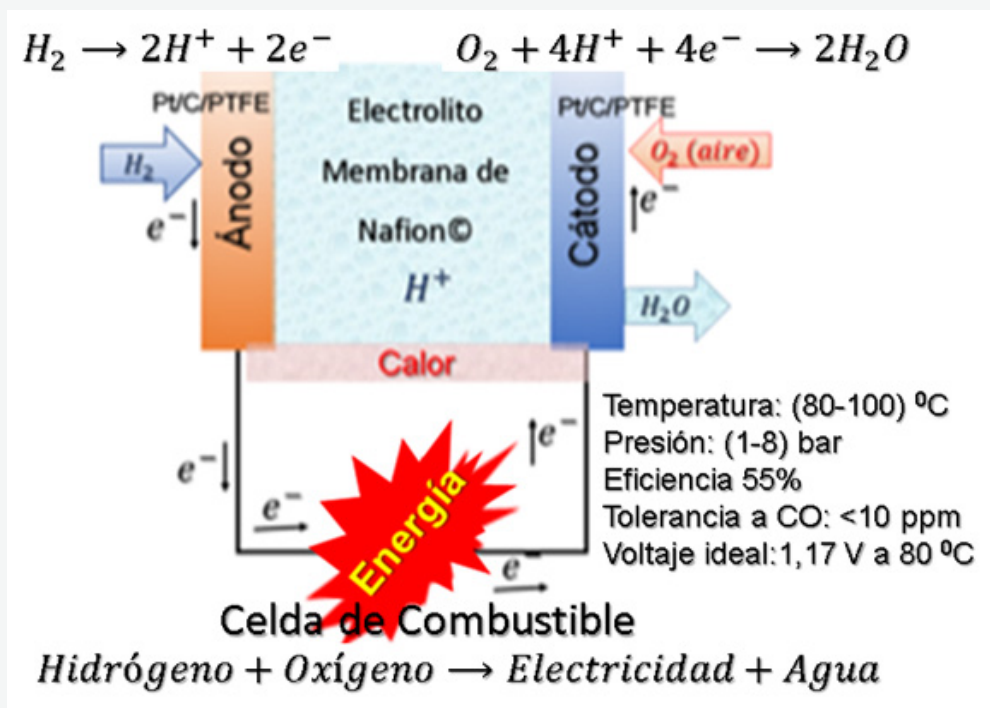


Figura 4.- Celda de Combustible con Membrana de intercambio protónico, PEM (Proton Exchange Membrane)

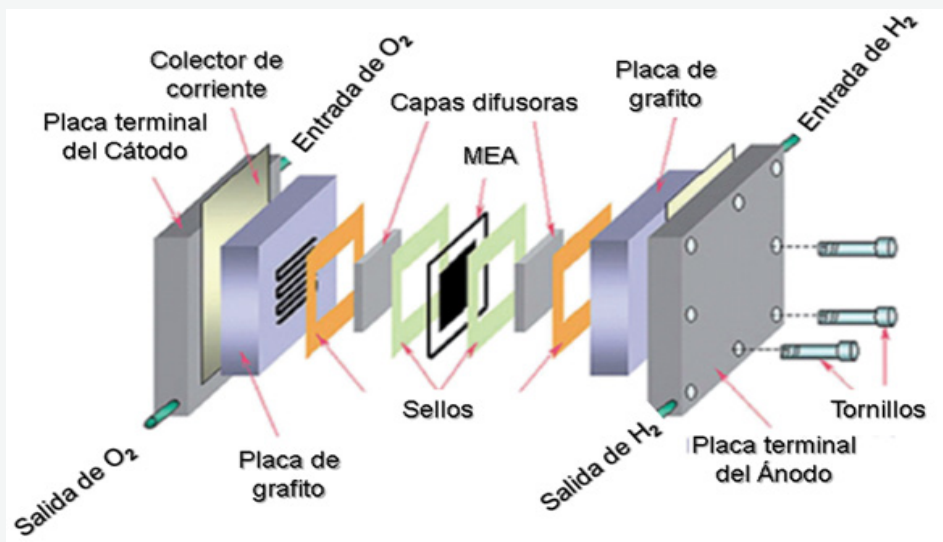


Figura 5.- Componentes de la Celda PEM (Ref. 8)

del voltaje promedio por el número total de celdas. De forma general, el potencial de la pila y la densidad de corriente no son parámetros independientes, sino que están relacionados a través de la curva de polarización.⁸

Combustible Hidrógeno en vehículos

El Hidrógeno puede reducir las emisiones de CO₂ actuando desde tres frentes⁴⁻⁶:

I. Si el Hidrógeno es obtenido de combustibles fósiles (mediante reformado de gas natural) y empleado en pilas de combustible, se logra una primera reducción en las emisiones de CO₂ debido a la mayor eficiencia de la pila respecto al motor alternativo.

II. Si el Hidrógeno se obtiene de fuentes renovables y se quema en motores alternativos la reducción de emisiones es muy drástica, incluso si el Hidrógeno obtenido a partir de gas natural se emplea en pilas de combustible.

III. Si el Hidrógeno obtenido de fuentes renovables, electrólisis con agua pura y se emplea en pilas de combustible, la contaminación ambiental se considera nula. El análisis anterior revela que el Hidrógeno y las pilas de combustible pueden ser una solución al problema del transporte.

La electrólisis tiene el potencial de permitir

la producción de Hidrógeno con un impacto medioambiental mínimo.^{5,14,20-22}

Por esta razón, al Hidrógeno producido por electrólisis se le ha dado la categoría de verde. Por supuesto, la principal ventaja de los vehículos de Hidrógeno es que se mueven de una forma que es totalmente limpia. No es solo que únicamente emiten vapor de agua, es que, además, sus componentes son mucho más sostenibles que las baterías de los vehículos eléctricos. Las celdas de combustible de Hidrógeno son completamente renovables.

Además, precisamente por esa falta de batería, los vehículos propulsados con Hidrógeno son considerablemente más ligeros que sus competidores eléctricos y no tienen que estar enchufados durante horas para cargarse. Los coches de Hidrógeno repostan de forma similar a los de gasolina, por lo que el tiempo que requieren es parecido. Es decir, que mientras que un coche eléctrico requiere de 5 horas para una carga completa, uno de Hidrógeno rellena el tanque en 5 minutos.

La falta de infraestructuras de carga, el elevado coste de producción del Hidrógeno verde y la mayor penetración del vehículo eléctrico van a provocar que la adopción como medio de transporte se retrase. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de vehículos eléctricos y de Hidrógeno

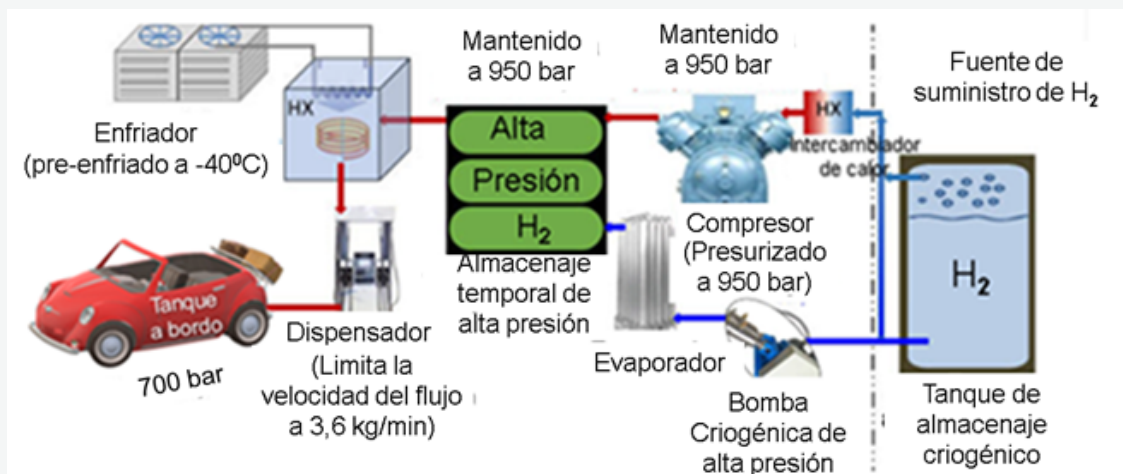


Figura 6.- Estación de recarga de Hidrógeno líquido

no se excluyen mutuamente. Es más, dadas las diferencias entre ambos, la combinación podría ser el camino a seguir. Los coches eléctricos ofrecen ventajas inigualables para el transporte de corta distancia, mientras que los de Hidrógeno podrían demostrarse como la mejor opción para desplazamientos de media o larga distancia.

Las aplicaciones de pilas de combustible en automoción pasan mayoritariamente por las pilas PEMFC, que, si bien presenta problemas técnicos, tales como una crítica gestión de la humedad de la membrana o problemas de vibraciones con la misma membrana, resulta muy adecuada dada su baja temperatura de operación, lo que facilita el período de arranque.²³

Entre las diferentes alternativas estudiadas para el suministro de Hidrógeno a la Pila, se plantean las formas de Hidrógeno como gas comprimido o en forma líquida, siendo ésta última más compleja pues requiere almacenamiento y manipulación criogénica (Figura 6).^{24,25}

El motor de Hidrógeno funciona gracias a una pila de combustible instalada en la parte delantera del vehículo. En la pila de combustible se produce una reacción química entre el Hidrógeno almacenado en los depósitos del vehículo y el oxígeno que llega del exterior.

Esta reacción produce electricidad para mover el vehículo y vapor de agua, que es lo

único que se expulsa por el tubo de escape. Un auto de pila de combustible también cuenta con una batería donde se acumula la electricidad sobrante para que sea utilizada en cualquier momento. También, existe comercialmente el vehículo NEXO, por ejemplo, dispone de tres tanques de Hidrógeno a presión, situados debajo del asiento posterior. Cada depósito tiene una capacidad de 52,2 litros.

En total almacenará un máximo 156,6 litros de Hidrógeno. El recargue de este combustible se hace en cinco minutos y con los tres depósitos cargados el NEXO puede recorrer una distancia de 666 kilómetros.

Desde el punto de vista de las estaciones de servicio (las llamadas hidrogeneras) también se plantea si la producción ha de ser in-situ a través de reformadores de gas natural o electrólisis, o bien de tipo centralizada y transportando el combustible en depósitos presurizados o de forma criogénica, de forma similar a como ocurre ahora con las refinerías y gasolineras.

En cuanto al tren de potencia, la opción más simple es la llamada “full-power”, consistente en que la pila alimenta a un motor eléctrico que acciona las ruedas. Sin embargo, el elevado coste de las pilas recomienda recurrir a pilas más pequeñas, las cuales requieren el empleo de una configuración híbrida, es decir, combinar el empleo de la pila de combustible con una batería que permita, por ejemplo,

aprovechar frenados regenerativos.

Esta idea de los vehículos híbridos parte de unos vehículos que ya están comercializados y que presentan rendimientos bastante elevados en los que el motor térmico convencional se acopla a una batería, ya sea en configuración serie o paralelo. En la configuración serie la energía para el motor eléctrico procede exclusivamente de la batería, que es cargada por el motor térmico (o pila de combustible); por el contrario, en la configuración paralela la transmisión es arrastrada a la vez por el motor térmico y por el motor eléctrico.

Una de las soluciones más viables es el uso del Hidrógeno verde como combustible.^{5,20-22} Su potencial es evidente como fuente de generación de energía renovable limpia y sostenible, que brinda múltiples ventajas para el medio ambiente. Incorporar el Hidrógeno verde a la combustión interna de los motores aumenta la eficiencia del combustible, lo que se traduce en un ahorro importante en el consumo y extiende la vida útil del motor.

El Hidrógeno azul es poco o no contaminante, dependiendo de su síntesis, el almacenamiento y el reciclaje de los carbonizantes formados en el proceso. El

Hidrógeno azul es también apropiado para su utilización como combustible, en medios de transporte terrestre, aéreo y marítimo.

Otras formas estudiadas de suministro de Hidrógeno a la pila contemplan el suministro del Hidrógeno producto de la oxidación del metanol;²⁶⁻²⁸ mezcla con combustibles fósiles para reducir emisiones de dióxido de carbono; suministro de metanol recurriendo a un reformado a bordo²⁹ y también gana aceptación la pila de metanol directo DMFC, es decir, una pila muy similar a la PEMFC, pero capaz de establecer sus reacciones a partir de metanol.^{30,31}

Si esta pila alcanzase su madurez tecnológica en poco tiempo facilitaría en gran medida la introducción de los vehículos con pila de combustible, ya que podrían utilizarse las infraestructuras de suministro (gasolineras) actuales. El metanol se obtiene en grandes reactores industriales utilizando altas presiones y a partir del dióxido de carbono (CO_2), que es el principal responsable del calentamiento global. Se sintetiza también el metanol a partir de CO_2 , agua y electricidad que puede provenir de fuentes renovables. De hecho, el metanol ya se utiliza de forma corriente en la industria como disolvente para pinturas, barnices y anticongelantes, también como

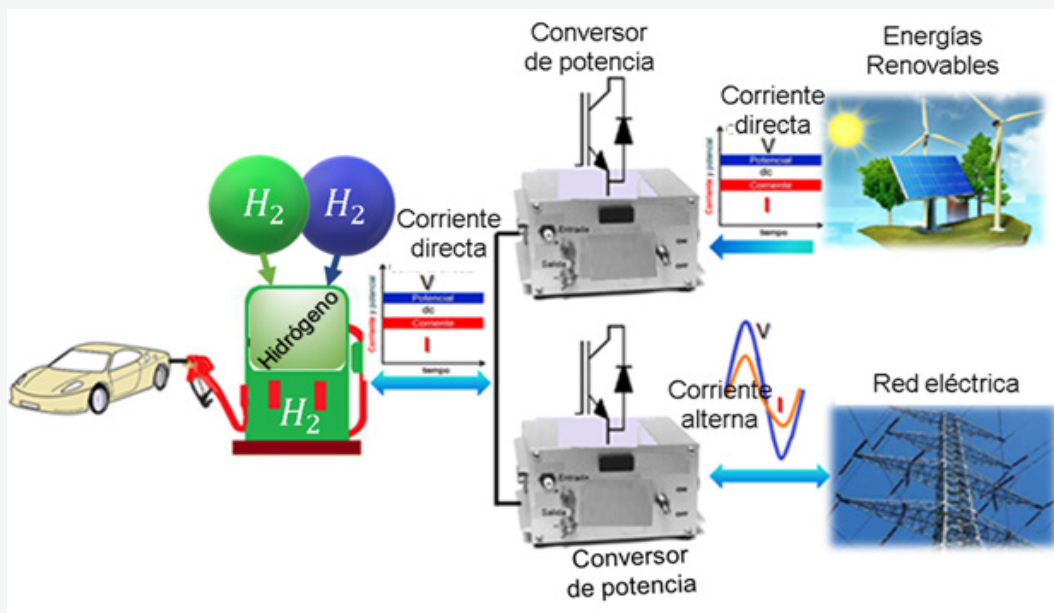


Figura 8.- Combustible vehicular Hidrógeno desde vectores metanol y amoníaco

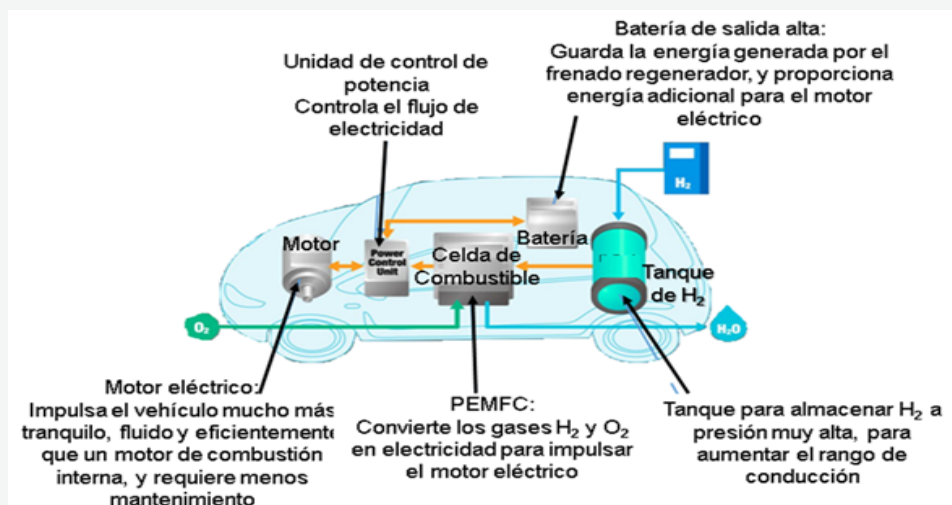


Figura 9. - Automóvil sin/o poco contaminante ambiental

combustible para automóviles. El CO_2 capturado en las plantas industriales como materia prima para fabricar metanol a gran escala mediante energías renovables lo convertiría en un nuevo combustible solar para alimentar nuevos sistemas mecánicos híbridos electrificados.

Por su parte, el amoníaco ofrece una gran potencialidad para ser utilizado como combustible en diferentes aplicaciones. El hecho de estar libre de carbono ofrece la posibilidad de alimentar turbinas de gas, calderas, celdas de combustible y motores de combustión interna sin emisiones de CO_2 asociadas a su uso, por lo que, si la energía y las materias primas utilizadas para producir el amoníaco proceden de fuentes renovables, todo el ciclo se considera completamente libre de carbono.

Además, actualmente el amoníaco ya se produce y comercializa en volúmenes considerables, por lo que ya existe la infraestructura necesaria para su transporte y almacenamiento, junto con procedimientos de manipulación segura bien establecidos.

El uso del amoníaco como combustible presenta ciertas ventajas, ya que permite utilizar motores de combustión interna similares a los actuales.

Además, su producción es económicamente viable y se puede llevar a cabo utilizando energía renovable, en paralelo con

la producción de Hidrógeno y otros combustibles neutros.³²⁻³⁴

El amoníaco garantiza, para el futuro, un sistema de energía libre de CO_2 . La alta densidad volumétrica del Hidrógeno, su baja presión de almacenamiento y su estabilidad para el almacenamiento a largo plazo, son algunas de las ventajas del amoníaco para el almacenamiento de Hidrógeno. Además, el amoníaco también se considera seguro, debido a su alta temperatura de autoignición, su baja presión de condensación y su baja densidad de gas comparada con el aire. El amoníaco puede producirse a partir de muchos tipos diferentes de fuentes de energía primaria, de particular interés las renovables.

En el lugar de utilización, la energía del amoníaco puede generarse directamente como combustible o descomponerse inicialmente en Hidrógeno para muchas opciones de su uso. El uso del amoníaco se ha centrado principalmente en la posible utilización directa del amoníaco debido a su mayor eficiencia energética total, abarcando el motor de combustión interna, la combustión para turbinas de gas y la celda de combustible de amoníaco directa.³⁵

Se ha propuesto también el uso del amoníaco para la producción insitu de Hidrógeno mediante su descomposición.³⁶ La figura 9 muestra un arreglo de los componentes del sistema energético en el vehículo.³⁷

Tabla 3.- Tipos de tecnología de vehículos eléctricos (Ref. 37)

Transporte Portátil Residencial		
100% Eléctricos a baterías BEV	Uno o varios motores eléctricos que pueden ser recargados en la red	Incorpora sistema de recuperación de energía de la frenada y las deceleraciones
Vehículos eléctricos de hidrógeno FCEV	Movido por pila de combustible de hidrógeno	Se genera una corriente eléctrica en la pila, que mueve el motor eléctrico
Vehículos eléctricos de autonomía extendida EREV	Motor de combustión de gasolina y uno o varios eléctricos	Cuando la batería tiene suficiente carga el motor de gasolina se encuentra parado y el vehículo se mueve sin emisiones. Cuando la batería requiere energía se pone en marcha el motor de combustión para recargarla y mover el motor eléctrico.
Vehículos híbridos enchufables PHEV	Motor de gasolina acompañado por un motor eléctrico	Movimiento del carro por cada motor o en forma combinada. Motor eléctrico con batería enchufable a la red
Vehículos híbridos no enchufables HEV	La batería se puede recargar utilizando el motor de combustión o la energía de la frenada y desaceleraciones	Reducen los consumos, sobre todo en recorridos urbanos.
Híbridos suaves de 48 voltios	Sistema eléctrico de 48V (sustituye el de 12V)	Puede detener el motor de combustión (disminución del consumo y emisiones) y reactivarlo cuando se requiera. Puede accionar pequeños motores eléctricos

Conclusiones

- ⊕ Para su utilización el Hidrógeno puede combinarse con el oxígeno por procesos térmicos (MCI, turbinas) o electroquímicos (pilas de combustible) para generar energía mecánica o eléctrica con una emisión solo de vapor de agua.
- ⊕ Las pilas de combustible instaladas tipo PEM, se muestran como una tecnología apropiada para un gran número de aplicaciones, desde equipos portátiles hasta grandes centrales de producción de energía estacionaria y en transporte y dispositivos móviles.
- ⊕ Las grandes ventajas de los vehículos de pilas de combustible frente a los vehículos eléctricos son el menor tiempo de recarga y/o descarga y frente a los convencionales (incluidos los híbridos) el uso de un combustible que no es ni limitado ni contaminante.
- ⊕ Vehículos eléctricos operando con celdas de combustible y con Hidrógeno almacenado a bordo producen cero contaminaciones. No hay emisión de gases contaminantes ni gases de efecto invernadero.
- ⊕ Muchas empresas manufactureras de vehículos a celdas de combustible cuentan ya con desarrollos en proceso, algunas ya con ejemplares comercializados. Y se han incorporado estas celdas de combustible en el transporte, buses, locomotoras, buques, aviones, motocicletas.

⊕ Hay actualmente una demanda por la fabricación de reformadores, electrolizadores, catalizadores y nuevas membranas, desarrollo de materiales y ensamblaje de pilas de combustible, en particular pilas de combustible PEM. También requerimientos por una red de estaciones de servicio de Hidrógeno (hidrogeneras) y por la incorporación de dispensadores de Hidrógeno en estaciones de servicio convencionales.

Agradecimiento: Los autores agradecen a la Universidad de los Andes – Mérida, por su apoyo académico

Referencias

- 1.- Márquez J, Márquez OP, Weinhold E, Márquez K. 2021. Hidrogeno desde la energía Solar (con Electroquímica). Una revisión. Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa (RITE). 4(1)11-27. <http://revistas.saber.ula.ve/rite>.
- 2.- Márquez P Jairo, Márquez P Olga, Martínez Yris, Márquez Keyla, Weinhold Elkis, Ortíz Reynaldo. 2022. Electroquimienergía y Cambio Climático: una revisión. InfoANALÍTICA 10(1).
- 3.- Linares H JI, Moratilla S BY. 2007. El Hidrógeno y la Energía. Avances de Ingeniería. Asoc. Nac. de Ingenieros del ICAI y Univ. Pontificia Comillas. Madrid - España.
- 4.- Morante JR, Andreu T, García G, Guilera J, Tarancón A, Torrell M. 2020. Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada. Fundación Naturgy.
- 5.- Márquez OP, Márquez K, Weinhold E, Márquez J. 2023. Vector Energético: Hidrógeno Multicolor (con electroquímica). pg. 65 – 78. Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa (RITE) 6(1) Enero – Junio. ISSN: 2665-0339.
- 6.- IRENA-Green hydrogen policy. 2020. Selección de tipos de Hidrógeno. Pag.8.
- 7.- Van de Graaf Thijs. 2021. Energía y Geoestrategia. Cap. 3. El Hidrógeno limpio: la piedra angular de un nuevo escenario geopolítico. 191-241.
- 8.- Barreras F, Lozano A. 2012. Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM. www.energia2012.es.
- 9.- Bisquert J. 2005. Sistemas electroquímicos y nanotecnología para el almacenamiento de energía limpia. Energías renovables Caja España. Universitat Jaume I, 12071 Castelló.
- 10.- Groll S. 2021. Energía para un futuro neutro desde el punto de vista climático. Heinrich-Böll-Stiftung e.V., Schumannstraße 8, 10117 Berlin.
- 11.- Mexpolímeros. www.mexpolimeros.com.
- 12.- Centro Nacional de Experimentación de Tecnologías de Hidrógeno y Pilas de Combustible (CNH₂). Ciudad Real. España.
- 13.- El-Shafie M, Kambara S, Hayakawa Y. (2019) Hydrogen Production Technologies Overview. Journal of Power and Energy Engineering ,7, 107-154. <https://doi.org/10.4236/jpee.2019.71007>.
- 14.- Márquez OP, Márquez J. (2020). Hidrogeno vía Electroquímica, Cap. 16. Una Educación Universitaria de Calidad (Tomo II). Publicación Vicerrectorado Académico ULA. ISBN

978-980-11-1858-9. ULA-Mérida-Venezuela.

- 15.- P de la Torre Iglesias-Sarría. 2019. Hidrógeno y Pilas de Combustible. Perspectivas de Futuro en el transporte. Colegio Universitario de Estudios Financieros. Tesis. Madrid.
- 16.- El Hidrógeno y las Pilas de Combustible. 2007. Edición para la Comunidad Autónoma de Castilla y León. E.I.S.E. Domenech, S.A. España.
- 17.- Asensio, P. 2020 Hidrógeno y pila de combustible. Energías renovables. p., (1-20) Ed. Fundación de Energía de la Comunidad de Madrid.
- 18.- Vallejo OP. 2003. “Ensamble y evaluación de una celda de combustible tipo PEM” Tesis Maestría. Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ). Méjico.
- 19.- Muthukumar M, Rengarajan N, Velliyangiri B, Omprakas MA, Rohit CB, Raja UK. (2021). The development of fuel cell electric vehicles–A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1181-1187.
- 20.- Chamorro RJ. 2009. Modelamiento, Optimización y Control de una Planta de Producción de Hidrógeno para Celdas de Combustible. Tesis de Maestría Universidad del Norte, Barranquilla.
- 21.- Ibrahim Dincer. 1971. Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* (Pergamon)-Vol. 37, Iss: 2, pp 1954-1971.
- 22.- Bhandari, R., Trudewind, C.A. and Zapp, P. (2014) Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Electrolysis Review. *Journal of Cleaner Production*, 85,151-163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.04>.
- 23.- Grupo TES (Transport Energy Strategy) del V Programa Marco de la Unión Europea y de Daimler Chrysler [GONZO6].
- 24.- Carlos Marschoff, Jairo Márquez P., Olga P. Márquez. 2023. Electromovilidad para un Medioambiente más Limpio. *Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa (RITE) Vol 6 N 1.* 79-91. ISSN: 2665-0339.
- 25.- <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam>.
- 26.- Junjie Chen. 2022. Methanol steam reforming for hydrogen production in microchannel reactors. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS) Vol 1, No 4,* 01-27.
- 27.- Lu. W, Zhang. R, Toan. S, Xu. R, Zhou. F and Sun. Z. 2022. Microchannel structure design for hydrogen supply from methanol steam reforming. *Chemical Engineering Journal*, Volume 429, Article Number: 132286.
- 28.- Yao CZ, Wang LC, Liu. YM, Wu. GS, Cao. Y, Dai. WL, He. HY, Fan. KN. 2006. Effect of preparation method on the hydrogen production from methanol steam reforming over binary Cu/ZrO₂ catalysts, *Appl. Catal. A Gen.*, 297, 151–158.
- 29.- Trimm. DL. 2003. On-board hydrogen generation for fuel cell-powered vehicles: the use of methanol and propane, *Top. in Catal.*, 22, (2003), 359–367.
- 30.- Alias. MS, Kamarudin. SK, Zainoodin. AM, and Masdar. MS. 2020. Active direct methanol

fuel cell: An overview. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 38, 2020, Pages 19620-19641.

- 31.- Kawamura. Y, Ogura. N, Yamamoto. T, and Igarashi. A. 2006. A miniaturized methanol reformer with Si-based microreactor for a small PEMFC. Chemical Engineering Science, Volume 61, Issue 4, Pages 1092-1101.
- 32.- A.G. Olabi, Abdelkareem. MA, Al-Murisi. M, et al. (2023). Recent progress in Green Ammonia: Production, applications, assessment; barriers, and its role in achieving the sustainable development goals. Energy Conversion and Management, 277, 116594.
- 33.- Márquez OP & Márquez JP. 2023. El amoníaco como almacenaje químico de Hidrógeno. Amerika Latina y El Karibe. Debate e Ideas. Caracas-Venezuela.
- 34.- Aleasoft Energy Forecasting. 2021. El amoniaco verde o cómo transportar el Hidrógeno renovable (2021). <https://elperiodicodelaenergia.com/el-amoniaco-verde-o-como-transportar-el-hidrogeno-verde/>.
- 35.- Olabi, AG., Abdelkareem, MA., Al-Murisi, M., Shehata, N., Alami, AH., Radwan, Castro MA. 2021. Sistemas de producción de potencia utilizando amoníaco y su aplicación en ciclos combinados. Tesis de Grado. Dpto. Ingeniería Energética. Sevilla – España.
- 36.- Lucentini I. 2021. Producción de Hidrógeno a partir de Amoniaco en Reactores de paredes catalíticas. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- 37.- García G. 2018. Tipos de vehículos eléctricos: funcionamiento y características de cada tecnología. (<https://www.hibridosyelectricos.com/>).
- 38.- Muthukumar M, Rengarajan N, Velliyangiri B, Omprakas MA, Rohit CB, Raja UK. (2021). The development of fuel cell electric vehicles–A review. Materials Today: Proceedings, 45, 1181-1187.