

**USO DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE ALTERNATIVA PARA ALIMENTAR
PILAS DE COMBUSTIBLE**

ERIKA ALEXANDRA MAHECHA RODRIGUEZ

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2018**

**USO DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE ALTERNATIVA PARA ALIMENTAR
PILAS DE COMBUSTIBLE**

ERIKA ALEXANDRA MAHECHA RODRIGUEZ

**Monografía para optar por el título de especialista en
Gestión Ambiental**

**Asesor(a)
DORA MARÍA CAÑÓN RODRÍGUEZ
Ingeniera Química**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2018**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma director especialización

Firma Calificador

Bogotá, D.C. Mayo de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García Peña

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada

Dr. Luis Fernando Romero Suarez

Director de la Especialización en Gestión Ambiental

Dr. Francisco Archer Narváez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documentos. Estos corresponden únicamente al autor.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	13
1. MARCO TEORICO	14
1.1 HIDRÓGENO	14
1.2 FUENTES RENOVABLES	15
1.2.1 Energía solar	15
1.2.2 Energía eólica	16
1.2.3 Energía hidráulica	17
1.2.4 Energía geotérmica	17
1.2.5 Biomasa	18
1.3 PILAS DE COMBUSTIBLE	19
2. MÉTODOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	21
2.1 PROCESOS CONVENCIONALES	22
2.1.1 Reformado con vapor	23
2.1.2 Oxidación parcial	23
2.1.3 Pirolisis	24
2.1.4 Gasificación	25
2.1.5 Electrólisis	27
2.2 PROCESOS BIOLÓGICOS O NO CONVENCIONALES	30
2.2.1 Biofotólisis directa	31
2.2.2 Biofotólisis indirecta	32
2.2.3 Fotofermentación	33
2.2.4 Fermentación Oscura	34
3. TECNOLOGÍAS PARA USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	38
3.1 COMPONENTES BASICOS	38
3.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE	39
3.3 TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE	41
3.3.1 Pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC)	42
3.3.2 Pilas de combustible alcalinas (AFC)	43
3.3.3 Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)	44
3.3.4 Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)	44
3.3.5 Pilas de combustible de óxidos solidos (SOFC)	45
3.4 APLICACIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE	45
3.4.1 Aplicaciones portátiles	45
3.4.2 Aplicaciones estacionarias	46

3.4.3 Aplicación en el transporte	47
4 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL USO DE HIDRGENO EN PILAS DE COMBUSTIBLE	51
4.1 VENTAJAS	51
4.1.1 Eficiencia	51
4.1.2 Emisiones	52
4.1.3 Modulares	53
4.2 LIMITACIONES	54
4.2.1 Infraestructura	54
4.2.2 Almacenamiento	54
4.2.3 Costos	56
4.2.4 Vida útil	57
5. CONCLUSIONES	58
6. RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFIA	60

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Características de los biocombustibles	18
Cuadro 2. Características de las pilas de combustibles	19
Cuadro 3. Condiciones de operación en procesos de pirolisis	25
Cuadro 4. Combustibles empleados en la gasificación	26
Cuadro 5. Ventajas y desventajas de los procesos convencionales para la producción de hidrógeno	28
Cuadro 6. Variables en el proceso de fermentación oscura	35
Cuadro 7. Eficiencias y costos de producción para procesos biológicos de producción de H ₂	36
Cuadro 8. Características de los principales tipos de pilas de combustible	42
Cuadro 9. Modelos de vehículos de pilas de combustible de hidrógeno	47

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Curva de polarización para una pila de combustible	41
Gráfica 2. Comparación entre las eficiencias de los sistemas de generación de energía	51
Gráfica 3. Comparación de emisiones producidas con diferentes combustibles	53
Gráfica 4. Comparación entre densidad volumétrica y densidad gravimétrica de diferentes combustibles	55
Gráfica 5. Comparación entre volúmenes de tanques de combustible	56

RESUMEN

Esta monografía tiene como propósito describir el uso del hidrógeno como fuente alternativa para alimentar pilas de combustible. El hidrógeno en los últimos años ha sido catalogado como el combustible del futuro debido a su alto rendimiento energético sin producir gases de efecto invernadero. En este estudio se presenta los métodos de producción de hidrógeno los cuales se clasifican entre convencionales y no convencionales, siendo estos últimos de mayor interés al ser renovables y amigables con el medio ambiente. Se describe la tecnología desarrollada para el aprovechamiento del hidrógeno en la generación de electricidad donde se exponen los tipos de pilas de combustible existentes, sus componentes, su funcionamiento y las aplicaciones. Al ser una tecnología tan reciente, se muestran sus ventajas y limitaciones en las áreas donde se necesita intensificar la investigación para hacer de las pilas de combustible una herramienta técnica y económicamente viable para el reemplazo de los combustibles fósiles.

Palabras claves: Energías Alternativas, Hidrógeno, Pilas de Combustible.

INTRODUCCIÓN

Aunque el mundo ha experimentado varias crisis energéticas a lo largo de la historia, especialmente en las dos últimas décadas, el consumo de energía ha ido en aumento. Desde hace unos años atrás según Tasri¹, se espera que la demanda de energía a nivel mundial aumente a una tasa promedio de 1,8%/año dentro del período 2000 – 2030.

Los combustibles de origen fósil, carbón, gas natural y petróleo, son la principal fuente de energía en el mundo y suministran el 81% de la demanda total de energía. Particularmente, el consumo mundial de petróleo para el año 2012 se estimó en 89 millones de barriles por día, aproximadamente la mitad con la finalidad de producir gasolina. Según Arifin², para el año 2025 se proyecta que la demanda de energía incrementará más del 50%, lo cual es un problema debido a que la producción de las reservas conocidas de gas y petróleo caerá entre el 40 y 60% para el año 2030. Por otro lado, el uso de estos está ligado a problemas ambientales que se ven reflejados en el deterioro de la capa de ozono, el cambio climático y el calentamiento global, además del daño al medio ambiente provocado principalmente por la emisión de CO₂. Como resultado del uso de combustibles fósiles se espera que la cantidad de CO₂ descargado hacia la atmósfera aumente más del doble en el período 1990 – 2030, de 21 a 45 Gt³.

Por estas razones, muchos investigadores alrededor del mundo han estado trabajando en las denominadas “energías alternativas” como fuentes de energía que puedan sustituir el consumo de combustibles fósiles. Como su nombre lo dice, se caracterizan por ser renovables y amigables con el medio ambiente, que permiten mitigar o disminuir el daño provocado hasta el día de hoy.

Entre otras opciones, se encuentra el hidrógeno como combustible renovable del futuro por su capacidad para generar potencia sin la emisión de dióxido de carbono, que puede ser fácilmente usada en celdas de combustibles para la generación de electricidad o en motores de combustión. Sumado a lo anterior,

¹ TASRI, Adek Y SUSILAWATI, Anita. Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia. En: Sustainable energy technologies and assessments. [ScienceDirect]. Septiembre 2014. Vol 7. p. 34-44. ISSN 2213-1388. [Consultado 15, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138814000265

² ARIFIN, Yalun. Et al. A Second Generation Biofuel from Cellulosic Agricultural By-product Fermentation Using Clostridium Species for Electricity Generation. En: Energy Procedia [ScienceDirect]. Septiembre 2014. Vol 47. p. 310-315. ISSN 1876-6102. [Consultado 15, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021400246X

³ TASRI, A., & SUSILAWATI, A., Op. Cit., 34.

como indica Kadpan⁴ el hidrógeno tiene un alto rendimiento energético de 122 kJ/g, el cual es 2.75 veces más grande que el de los hidrocarburos convencionales. En los últimos años se han desarrollado numerosas investigaciones en procesos de producción de hidrógeno no convencionales que incluyen biofotólisis directa, biofotólisis indirecta, foto-fermentación y fermentación oscura en la que se utilizan microorganismos entre los que se encuentran bacterias del género *Clostridium spp* que producen Hidrógeno gaseoso como resultado de sus procesos fermentativos. Este gas ahora es visto con el objetivo de suministrado a las pilas de combustibles y que estas logren ser económicas y de fácil adaptabilidad a los automóviles en lo cual nace el gran reto de poner al servicio el hidrógeno como combustible. Es por esto que este trabajo tiene como finalidad mostrar el panorama que tiene el hidrógeno desde su producción hasta su aplicación en diferentes campos importantes en el diario vivir para la generación de la energía eléctrica.

⁴ KAPDAN, Ilgi y KARGI, Fikret. Bio-hydrogen production from waste materials. En: Enzyme and Microbial Technology. [ScienceDirect]. Marzo 2006. Vol 38. No. 5, p. 569-582. ISSN 0141-0229 [Consultado 23, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141022905005053

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Describir el uso del hidrógeno como fuente alternativa para alimentar pilas de combustible

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los procesos de producción de hidrógeno como fuente combustible.
- Determinar el tipo de tecnología para utilizar el hidrógeno como fuente combustible.
- Identificar las ventajas y limitaciones que tiene el uso del hidrógeno como fuente alternativa de combustible.

1. MARCO TEORICO

1.1 HIDRÓGENO

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, a condiciones normales es un gas incoloro, inodoro, insípido, formado por moléculas diatómicas que no presenta toxicidad, altamente inflamable y reactivo, es el elemento de menor masa atómica y es menos denso que el aire⁵. Como lo expresa en su artículo Gutierrez⁶ la primera referencia de este elemento químico se dio en 1766 por el inglés Henry Cavendish quien lo denominó aire inflamable posteriormente fue Antoine Lavoisier le otorga el nombre por el que lo conocemos, hidrógeno.

Según Chen⁷, es un combustible limpio que como resultado de su combustión produce vapor de agua y no genera emisiones de CO_x, NO_x ni SO_x, que si se forman por el uso de combustibles fósiles. Por esta razón ha sido estudiado como una alternativa viable por más de un siglo hasta el punto que ha recibido el nombre de “combustible del futuro” por diferentes autores como Kapdan⁸. Otras características relevantes que afianzan su importancia como lo expone Kadpan⁹ es que puede ser utilizado fácilmente en celdas para la generación de energía eléctrica debido que libera durante su combustión una cantidad de energía de 122 kJ/g, el cual es 2,75 veces mayor que la energía que libera la combustión de combustibles fósiles. El mayor problema que presenta el hidrógeno como combustible es que no se encuentra libremente en la naturaleza, por lo que es necesario desarrollar métodos de producción relativamente económicos.

Pensar en el hidrógeno como el reemplazo de los combustibles fósiles todavía está muy lejos, sin embargo en muchos países se están desarrollando investigaciones en este tipo de tecnología y en cada parte en la que se puede dividir este sistema como el proceso de producción, almacenamiento, transporte, distribución y usos. En algunos países como Estados Unidos, Japón y en la Unión

⁵ LENNTECH, Hydrogen (H) – Chemical properties, Health and Environmental effects. [<http://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>]. Holanda. [Consultado 19, enero, 2018].

⁶ GUTIÉRREZ JODRA, Luis. El hidrógeno, combustible del futuro. En: Revista de la Real Academia de ciencias exactas, físicas y naturales.[Google Academico]. Madrid. 2005. Vol. 99, No. 1, p. 49-67 [Consultado 19, diciembre, 2017]. Disponible en <http://www.rac.es/ficheros/doc/00447.pdf>

⁷ CHEN,Xi, al at. Stoichiometric analysis of biological hydrogen production by fermentative bacteria. En: International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Marzo 2006. Vol 31. No. 4, p. 539-549. ISSN 0360-3199 [Consultado 25, enero, 2018] Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905001187

⁸ KAPDAN, Ilgi y KARGI, Fikret. Op. cit., p. 570

⁹ Ibid., p. 572

Europea como Alemania ya están circulando carros de hidrógeno y cuentan con estaciones de servicio, hidrogeneras, que suministran hidrógeno gas a presión e hidrógeno líquido. Durante los últimos años las empresas de automóviles, universidades y algunos fabricantes de pilas de combustible han desarrollado prototipos como por ejemplo Mazda, Renault, Ford y Nissan. En Madrid, Toyota desarrolló autobuses alimentados por hidrógeno a alta presión que luego llegaron a ciudades como Londres, Estocolmo, Ámsterdam, Hamburgo, Barcelona, Porto y Luxemburgo.

Existe en Canadá la autopista del Hidrógeno de más de 160 km entre Vancouver y Whistler dotada con un sistema de producción y abastecimiento, y se desarrollan proyectos apoyados por Shell, General Motors y BMW en California, Detroit, Washington y Nueva York. Con el interés que se tiene a nivel mundial debido a la contaminación generada por los subproductos originados en el proceso de combustión de los automóviles se están desarrollando diferentes investigaciones para el reemplazo de los combustibles fósiles por las energías alternativas que pueden ser una solución frente a los problemas medioambientales y energéticos que se tienen actualmente.

1.2 FUENTES RENOVABLES

Se ha promovido el interés mundial en el desarrollo de tecnologías renovables a raíz del cambio climático, la contaminación y la crisis energética de los combustibles de origen fósil. Estas fuentes de energía como su nombre lo indica pueden ser regeneradas y consisten en el aprovechamiento de los recursos naturales como por ejemplo el sol, el viento, los residuos orgánicos, la energía de las olas del mar, etc, puesto que son básicamente flujos de energía y no depósito como los son el carbón y el petróleo.

1.2.1 Energía solar. Este tipo de energía aprovecha la radiación solar recibida en la tierra sobre paneles fotovoltaicos que están elaborados principalmente por materiales semiconductores como el silicio para generar electricidad al recibir los fotones de la luz del sol, sin embargo se requiere más investigación en materiales y sus características ópticas para que su uso sea eficiente. Según Guan¹⁰, presenta entre sus ventajas su naturaleza inagotable, renovable y libre de contaminación pero hay que tener en cuenta que aplicación es afectada por varios factores como variabilidad dependiente de la ubicación geográfica y la baja densidad de potencia. Sus principales aplicaciones son el calentamiento de agua (para uso doméstico o industrial) y la generación de electricidad a pequeña escala.

¹⁰ GUAN Qing, al at. The rapid bi-level exploration on the evolution of regional solar energy development. En: Physica A: Statistical mechanics and its applications. [ScienceDirect]. Enero 2017. Vol 465.p. 49-61. ISSN 0378-4371 [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437116305234

Países como China, Alemania, Japón, Estados Unidos e Italia son líderes en el producción de energía solar y se han dado grandes avances pero la realidad es que este tipo de energía solo produce el 1% de la demanda mundial de electricidad, mientras que las energías no renovables siguen suministrando un 76,3% restante, según lo expone Guevara¹¹.

Para Murcia¹², en Colombia este tipo de tecnología ha venido tomando más fuerza etanto en el sector industrial como en el académico, el Instituto de Estudios Ambientales (IDEAM) es el ente que se encargado de realizar la evaluación de potencial de energía solar en el país dando como resultado la Guajira como la zona de mayor radiación con 2000-2100 kWh/m²/año comparado con el máximo mundial aproximadamente 2500 kWh/m²/año. Algunas empresas como Codensa evalúa implementar este tipo de energía en zonas rurales de difícil acceso y en Yumbo se pretende realizar un parque solar que abarcara 10 hectáreas desarrollado por la compañía Cesia el cual será capaz de generar diez megas de energía y entrara en funcionamiento en el segundo semestre del 2017¹³.

1.2.2 Energía eólica. Este tipo de energía aprovecha la velocidad del viento en aerogeneradores o molinos para producir energía. A nivel mundial el desarrollo es notable mostrando una gran capacidad eléctrica como fuente renovable no solo por la instalación de aerogeneradores en tierra sino por el interés que se ha despertado en la instalación off-shore, como lo muestran en el proyecto London Array¹⁴ en Inglaterra se encuentra el parque eólico marino más grande del mundo que produce cerca de 630 MW.

Actualmente la única planta eólica que tiene Colombia está ubicada en La Guajira y es básicamente un proyecto piloto de EPM, que tiene 19,5 MW de potencia

¹¹ CASA EDITORIAL EL TIEMPO. ¿Llegó La Hora De La Energía Solar? [SITIO WEB]. Colombia. Sectores. 30 de julio de 2016. [Consultado 22, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/en-2015-subio-un-25-la-oferta-de-energia-solar-en-el-mundo/16660148>

¹² MURCIA, Rodríguez. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de ingeniería. [Scielo]. Bogotá. 15,enero de 2009. Vol. 28. No 83 p. 83-89 ISSN 0121-4993. [Consultado 22, enero, 2018]. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n28/n28a12.pdf>

¹³ CASA EDITORIAL EL TIEMPO. Cesia trabaja en un parque solar para Yumbo-Colombia. [SITIO WEB]. Cali. Colombia. 28 de agosto de 2016. [Consultado 22, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/colombia/cali/empresas-y-valle/16685603>

¹⁴ LONDON ARRAY. London Array- The world's largest offshore wind farm. [SITIO WEB]. Londres. Reino Unido. 2009. [Consultado 25, enero, 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.londonarray.com/wp-content/uploads/London-Array-Brochure.pdf>

nominal¹⁵. Se ha propuesto la construcción de tres proyectos de generación de energía que podrán aportar 474 MW aproximadamente en esta misma zona del país y se estudia la posibilidad de conectarlo al Sistema de Transmisión Nacional.

1.2.3 Energía hidráulica. Se obtiene a partir del aprovechamiento del agua en movimiento para mover una turbina o paletas las cuales accionan un generador eléctrico. Este tipo de energía es más eficiente que los paneles solares o la energía eólica si la turbina hidráulica está ubicada en el sitio correcto pero tiene como desventajas que debe disponer de un buen suministro de agua pues depende de dos factores: la velocidad de flujo de agua y la altura de la caída, adicionalmente la construcción de centrales hidroeléctricas es muy costosa y los embalses producen pérdidas de suelo productivo y fauna terrestre. En Colombia la energía eléctrica es producida principalmente por este tipo de energía participando con un 63% del total de la capacidad instalada nacional, la cual supera los 14.000MW. En condiciones normales, cuando la demanda alcanza más de 9.000MW, las centrales hidráulicas pueden producir hasta el 80% de la energía necesaria¹⁶. Las más grandes hidroeléctricas en el país son Chivor (AES Chivor), San Carlos (Isagen) y el Guavio (Emgesa), tuvieron su máximo de producción en el 2012 logrando 4.139 GWh/mes. Se espera que se instalen más de 9 centrales con capacidades de 20 MW para el 2018.

1.2.4 Energía geotérmica. Es una fuente de energía renovable que aprovecha el calor del interior de la Tierra. Sus principales aplicaciones son: obtener agua caliente, generar electricidad, climatizar, es por esto que se puede utilizar tanto en el sector industrial y residencial. Colombia actualmente no implementa la obtención de energía por este medio pero dado que parte del territorio se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde el gradiente de temperatura natural del subsuelo, cerca de la superficie, es alto y se manifiesta con la actividad volcánica actual. Según Marzolf¹⁷, su potencial se encuentra en zonas adyacentes a los volcanes Chiles, Cerro Negro, Cumbal, Azufral, Galeras, Doña Juana, Sotará, Puracé, Nevado del Huila, Nevado del Ruiz y Nevado del Tolima.

¹⁵ PORTAFOLIO. El viento ganaría terreno como fuente de energía en el país. [SITIO WEB]. Colombia. Economía. 2 de febrero de 2015. [Consultado 27, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/viento-ganaria-terreno-fuente-energia-pais-39746>

¹⁶ COLOMBIA ENERGÍA. Generación hidráulica, fuente de energía y dinamo para las Exportaciones. . [SITIO WEB]. Colombia. 7 de agosto de 2013 [Consultado 25, enero, 2018]. Disponible en: <http://colombiaenergia.com/featured-article/generaci%C3%B3n-hidr%C3%A1ulica-fuente-de-energ%C3%ADa-y-d%C3%ADnamo-para-las-exportaciones>

¹⁷ MARZOLF, Natacha. Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia. [SITIO WEB]. Colombia. 2014. [Consultado 23, enero, 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6558/Energia%20Geotermica%20Colombia%207-1-14finalweb.pdf?sequence=1>

A nivel mundial se generan aproximadamente 11.000 MW, algunos países como Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, México, Italia, Nueva Zelanda, Islandia y Japón poseen el 90% de la capacidad total.

1.2.5 Biomasa. Como indica Salvador¹⁸, es un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza y composición que pueden emplearse para obtener energía. Se puede obtener una serie de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden ser utilizados para cubrir necesidades de transporte, industria y electricidad así como materias primas para la industria. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las características de los biocombustibles según el estado en el que se encuentren:

Cuadro 1 Características de los biocombustibles

Estado biocombustible	Características
Sólidos	Son los constituidos por material lignocelulósico procedente del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen este tipo de residuos, entre estos se encuentran la paja, los residuos del proceso de madera y/o agroalimentarias. De estos se puede extraer energía a través de procesos termoquímicos como la pirolisis, la gasificación y la combustión.
Líquidos	Son biocombustibles o biocarburantes los productos de origen biológico con alto poder calorífico utilizados como combustibles o aditivos en sistemas térmicos como motores, quemadores o turbinas. Actualmente solo son comerciales los de primera generación bioetanol y biodiesel, el primero es obtenido por fermentación de azúcares principalmente del maíz, remolacha y caña de azúcar; por otro lado el biodiesel utiliza el aceite de semillas oleaginosas como el girasol y la palma para el proceso de esterificación y transesterificación
Gaseosos	Combustibles como el biogás, gas de gasógeno y gas de síntesis e hidrógeno.

Fuente: El autor.

El alcohol carburante producido en Colombia proviene de los trece ingenios azucareros del Cauca y las seis destilerías de etanol que tiene una capacidad de producción promedio de 1.65 millones de litros al día de alcohol¹⁹. La producción de biodiesel a nivel industrial en el país empezó en el 2008 utilizando como

¹⁸ SALVADOR, Arturo. Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. En: Revista de la Real Academia de ciencias exactas, físicas y naturales. [Google Academico]. Madrid. 2010. Vol. 104. No. 2. p. 331-345. [Consultado 23, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>

¹⁹ REVISTA SEMANA. La Inestable Apuesta Por Los Biocombustibles. [SITIO WEB]. Colombia. Industria. 20 de febrero de 2016. [Consultado 22, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.semana.com/economia/articulo/biocombustibles-ya-no-son-tan-buen-negocio/461232>

materia prima el aceite de palma. Actualmente existen seis plantas de biodiesel y se está haciendo mezclado con diésel de origen como política de Estado para contribuir a la reducción de emisión de gases contaminantes y la dependencia a los combustibles de origen fósil. A futuro se espera que los cultivos de palma se incrementen para suplir la demanda en el 2020, la disponibilidad de tierras es de 7.3 millones de hectáreas para el desarrollo de proyectos de biocombustibles las cuales no invaden bosques nativos ni reservas forestales.

Los anteriores tipos de energías alternativas están siendo desarrolladas en busca de reemplazo de las fuentes de energía que tenemos actualmente siendo estas aplicadas en prototipos para la sustitución del uso de combustible fósil en los motores de combustión interna. Entre estas nuevas tecnologías se encuentran los carros eléctricos y de hidrógeno, los últimos que funcionan mediante pilas de combustible alimentadas con hidrógeno para producir electricidad.

1.3 PILAS DE COMBUSTIBLE

La importancia del hidrógeno en los últimos años radica en un factor ambiental donde brinda la posibilidad de ser empleado como combustible en el futuro, es por esto que una de las aplicaciones más estudiadas son las celdas de combustible para producir electricidad. Estas son unidades electroquímicas de flujo estable que poseen electrodos positivos y negativos y un electrolito que a diferencia de las baterías convencionales, puede operar continuamente, es decir, produce electricidad, calor y agua mientras esté siendo alimentada con combustible y oxígeno, puede transformar la energía química en eléctrica sin combustión razón por la cual no producen contaminación. Se pueden unir muchas celdas para formar una pila de combustible cuyo voltaje aumenta en proporción al número de celdas unidas.

De acuerdo con Rahamn²⁰ existen varios tipos de celdas de combustible incluidas celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFCs), celda de combustible alcalina (AFCs), celda de combustible de ácido fosfórico (PAFCs), celda de combustible de carbonato fundido (MCFCs), celda de combustible de óxido sólido (SOFCs) y celdas de combustible de metanol (DMFCs). En la siguiente tabla se muestran algunas de sus características:

Cuadro 2. Características de las pilas de combustibles

Tipo de celda	Ion móvil	Temperatura de operación	Aplicaciones
Alcalina (AFCs)	OH ⁻	50-200°C	Usado en vehículos espaciales
Membrana de	H ⁺	30-100°C	Sistemas CHP de baja potencia,

²⁰ RAHMAN, S. et al. Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology. En: Renewable and sustainable energy reviews.[ScienceDirect]. Diciembre 2016. Vol. 66. p. 137-162. ISSN 1364-0321. [Consultado 26, enero, 2018]. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116303756>

intercambio de protones (PEMFCs)			vehículos y aplicaciones móviles
Metanol (DMFCs)	H ⁺	20-90°C	Sistemas electrónicos portátiles de baja potencia
Ácido fosfórico	H ⁺	220°C	Numerosos sistemas CHP de 200kWh
Carbonato fundido (MFCs)	CO ₃ ²⁻	650°C	Sistemas CHP de escala mediana a alta
Oxido solido (SOFC)	O ²⁻	500-1000°C	Todos los tamaños de sistemas CHP, 2 kW a multi-MW

Fuente: DICKS, Andrew y RAND, David. Fuel cell systems explained. 2 Ed. West Sussex: Jhon Wiley & Sons Ltd. 2003. p. 15. ISBN 0-470-84857-X. [Consultado 25, enero, 2018]. Disponible en https://www.u-ursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Fuel_Cell_Systems_Explained.pdf

Las celdas tipo PEMFC han llamado mucho la atención por su operación a baja temperatura por debajo de los 100°C usando el hidrogeno como combustible y oxigeno como reactante además de su simplicidad, utiliza un polímero sólido como electrolito en el cual los protones pueden moverse. Poseen un ensamblaje de membranas de electrodos compuesta de una capa de catalizador, una capa de gas difusor, una capa micro-porosa, un canal para flujo de gas y unos platos bipolares. Como indica Lopes²¹ la capa de catalizador juega un papel muy importante y de su degradación depende de la durabilidad de la celda es por esto que hay que tener en cuenta la concentración de contaminantes como CO y H₂S (CO<10ppm y H₂S<1ppm) pues su tolerancia es muy baja y pueden reducir la actividad catalítica dando como resultado una baja eficiencia de la celda de combustible.

²¹ LOPES, Thiago; PAGANIN, VALDECIR A. y GONZALEZ, Ernesto R. The effects of hydrogen sulfide on the polymer electrolyte membrane fuel cell anode catalyst: H₂S–Pt/C interaction products. En: Journal of power sources. [ScienceDirect]. 1 agosto 2011. Vol. 196. No. 15, p. 6256-6263. ISSN 0378-7753 [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311008044

2. MÉTODOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

En la actualidad existen un gran número de procesos que emplean diferentes alternativas para la producción de hidrógeno a nivel industrial. Según Acar²², entre los métodos convencionales se encuentran los procesos termo-químicos (tales como el reformado con vapor, la gasificación o la pirolisis), llamados así porque se necesitan grandes cantidades de energía calórica para llevar a cabo las reacciones químicas y se caracterizan porque emplean fuentes de energía convencionales tales como combustibles de origen fósil, bien sean líquidos o gaseosos, o vapor de agua para poder alcanzar altas temperaturas que el proceso necesita como lo indica Brown²³. Otra alternativa es la producción mediante métodos electro-químicos como la electrólisis que aunque no involucra altas temperaturas sí demanda una gran cantidad de energía eléctrica, lo que se refleja en su alto costo.

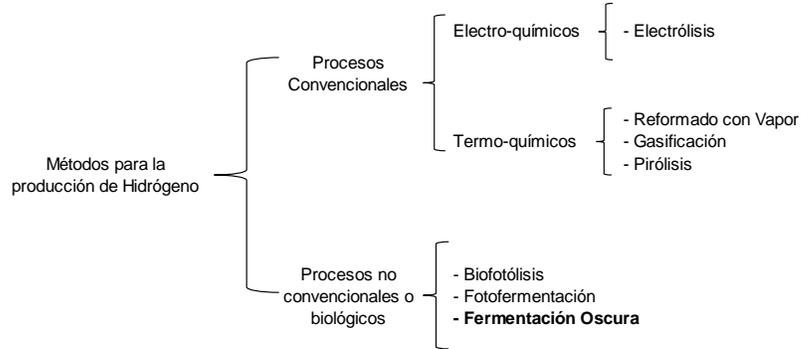
Finalmente existen otro tipo de procesos no convencionales, según Steinberg²⁴ se caracterizan principalmente por ser procesos netamente biológicos, que no demandan mayor cantidad de energía y actualmente se están desarrollando con el fin de viabilizarlos técnica y económicamente. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ilustra los principales procesos involucrados en esta clasificación:

²² ACAR, C. & DINCER, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. En International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Enero 2014. Vol. 39. No. 1, p. 1-1. ISSN 0360-3199 [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913025330

²³ BROWN, L. High efficiency generation of Hydrogen fuels using thermochemical cycles and nuclear power. [SITIO WEB]. Nueva Orleans. Marzo 2002. [Consultado 28, enero, 2018]. Archivo pdf. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Lloyd_Brown/publication/266499493_GA-A24326_HIGH_EFFICIENCY_GENERATION_OF_HYDROGEN_FUELS_USING_THERMOCHEMICAL_CYCLES_AND_NUCLEAR_POWER/links/543d5e180cf25d6b1ad8ba01.pdf

²⁴ STEINBERG, Meyer. A highly efficient combined cycle fossil and biomass fuel power generation and hydrogen production plant with zero CO₂ emission. En American Society of Mechanical Engineers. [Google Academico]. Nueva York. Junio 2004. ISBN 0-7918-4165-0. [Consultado 27, enero, 2018]. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Lloyd_Brown/publication/237441113_High_Efficiency_Generation_of_Hydrogen_Fuels_Using_Nuclear_Power/links/0c9605269964f461b0000000/High-Efficiency-Generation-of-Hydrogen-Fuels-Using-Nuclear-Power.pdf

Figura 1. Clasificación de los procesos para la producción de hidrógeno según la fuente de energía



Fuente: JUNG, Kyung-Won et al. Bioreactor design for continuous dark fermentative hydrogen production. En: *Bioresource Technology*. [ScienceDirect]. Septiembre 2011. Vol. 102. No. 18. P. 8612-8620. ISSN 0960-8524. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411004135.

2.1 PROCESOS CONVENCIONALES

Como lo indica Parthasarathy²⁵ los procesos convencionales han sido empleados en la actualidad como una de las opciones a corto plazo para la producción de hidrógeno. Estos procesos, entre los cuales se encuentran el reformado con vapor, la gasificación y la pirólisis, han sido la solución más prometedora para la producción de este combustible hasta el día de hoy por medio de una gran variedad de materias primas. Según Kalamaras²⁶, anualmente se estima una producción de 55 millones de toneladas y su consumo aumenta en 6% por año generado en mayor proporción mediante el reformado de vapor del gas natural (50%) seguido por el reformado de petróleo y naftas (30%).

A continuación se describirán algunos de estos procesos de producción de hidrógeno.

²⁵ PARTHASARATHY, Prakash y NARAYANAN, Sheeba. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review. En: *Renewable Energy*. [ScienceDirect]. Junio 2014. Vol 66. p 570-579. ISSN 0960-1481. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113007027

²⁶ KALAMARAS, Christos y EFSTATHIOU Angelos. Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. En: *Conference paper of energy*. [Google Academico]. Limasol. Noviembre 2012. Vol 2013. p. 9. ISSN 690627. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.hindawi.com/journals/cpis/2013/690627/

2.1.1 Reformado con vapor. Como lo afirma Karimipourfard²⁷, es el método más utilizado comercialmente para la producción de gas de síntesis por ser menos costoso en comparación con los demás pero su eficiencia es afectada negativamente cuando hay presencia de hidrocarburos pesados e implica la regeneración de catalizadores. Involucra básicamente una conversión catalítica del hidrocarburo que se lleva a cabo en una planta que cuenta con una unidad de desulfuración, secciones de reformado y limpieza y equipos adicionales como bombas, compresores, intercambiadores de calor, entre otros, a temperaturas que pueden superar los 500°C de acuerdo con Sørensen²⁸ y Ersöz²⁹, presiones por encima de los 3.5 MPa y relaciones vapor- carbono de 3.5. Los catalizadores pueden estar divididos en dos tipos: metales no preciosos (níquel) y metales preciosos del grupo VIII entre los que se utilizan platino o rodio sin embargo el alto costo han llevado a muchos investigadores a desarrollar catalizadores basados en cobalto. El reformado con vapor se usa comúnmente a partir del metano donde se han logrado eficiencias hasta de 80%.

En el caso de las pilas de combustible en la cual podría ser una aplicación del hidrógeno, se están desarrollando tecnologías en las que se inyecta carbón activado que captura el dióxido de carbono en el reformado con vapor que sirve para reducir las emisiones de gases efecto invernadero y evita el envenenamiento a los catalizadores.

2.1.2 Oxidación parcial. A diferencia del reformado con vapor que necesita materias primas de alta calidad para no afectar a los catalizadores cuando se trabajan a temperaturas de 800°C que podrían impedir el flujo de gas, en este proceso se pueden utilizar el fuelóleo pesado y los aceites residuales. Como lo indica Nikolaidis³⁰, consiste en la oxidación incompleta de un hidrocarburo donde

²⁷ KARIMIPOURFARD, D., KABIRI, S., y RAHIMPOUR, M. A novel integrated thermally double coupled configuration for methane steam reforming, methane oxidation and dehydrogenation of propane. En: Journal of natural gas science and engineering. [ScienceDirect]. Iran. Noviembre 2014. Vol 21. p. 137. ISSN 1875-5100. [Consultado 27, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510014001814

²⁸ SØRENSEN, Bent. Hydrogen and Fuel Cells Emerging Technologies and Applications, [ScienceDirect]. 2 Ed. Nueva York: Academic Press. 2005, p. 450. ISBN 9780123965035. [Consultado 27, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/book/9780123877093

²⁹ ERSÖZ, Atilla. Investigation of hydrocarbon reforming processes for micro-cogeneration systems. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2008. Vol. 33. No 23. p. 7084-7094. ISSN 0360-3199. [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908008239

³⁰ NIKOLAIDIS, Pavlos y POULLIKAS, Andreas. A comparative overview of hydrogen production processes. En: Renewable and sustainable energy reviews. . [ScienceDirect]. Enero 2017. Vol. 67. p. 597-611. ISSN 1364-0321. [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305366

se oxida el carbono (CO) y se produce el hidrógeno a presión atmosférica y temperaturas superiores de 800°C y para los procesos catalíticos entre 1150-1350°C.

Los catalizadores más utilizados para la conversión del gas natural están basados en níquel o rodio, sin embargo el níquel tienen una fuerte tendencia a la formación de coque y el rodio presenta una desventaja por sus elevados costos como lo afirma Holladay³¹. Según Kraleva³² para este proceso es de gran importancia una adecuada selección del catalizador, este debe maximizar la selectividad hacia el hidrógeno y monóxido de carbono disminuyendo la producción de dióxido de carbono e inhibiendo la formación de coque así como también se ve afectado el rendimiento por las variables como temperatura, presión y relación molar. Se han hecho investigaciones como el desarrollado por Wang³³ tomando como materia prima el bioetanol en el proceso de oxidación parcial del cual se han obtenido rendimientos entre 86-95% sin la formación de coque para ser aplicado en celdas SOFC por su alta flexibilidad respecto al combustible.

2.1.3 Pirolisis. Según Demirbas³⁴, es la descomposición térmica que ocurre en ausencia de oxígeno que se puede llevar a cabo usando compuestos líquidos, sólidos o gaseosos para la generación de gas de síntesis, bio-char (biocarbon) y bio-aceites. El rango de temperatura necesaria esta entre 625 y 775K a 0,1 y 0,5 MP. Existen tres tipos de pirolisis que se llevan a cabo: pirolisis convencional, pirolisis rápida (fast pyrolysis) y pirolisis instantánea (flash pyrolysis). En la siguiente tabla se muestran las condiciones de cada uno de estos:

³¹ HOLLADAY, J. et al. An overview of hydrogen production technologies. En: *Catalysis today*. [ScienceDirect]. Enero 2009. Vol. 139. No. 4 p. 244-260. ISSN 1364-0321. [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586108004100

³² KRALEVA, Elka, et al. Hydrogen production by bioethanol partial oxidation over Ni based catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental* [ScienceDirect]. Diciembre 2015. Vol. 179. p. 509-520. ISSN 0926-3373. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337315003215

³³ WANG, Wenju y WANG, Yaquan. Thermodynamic analysis of hydrogen production via partial oxidation of ethanol. En: *International journal of hydrogen energy*. [ScienceDirect]. Octubre 2008. Vol. 33. p. 5035-5044. ISSN 0360-3199. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990800952X

³⁴ Demirbas A. Thermochemical conversión of mosses and algae to gaseous products. En: *Energy Sour Part A*. [Google Académico]. Febrero 2009. Vol 31. No.9. p. 746–753. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567030701752594>.

Cuadro 3. Condiciones de operación en procesos de pirolisis.

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Producto mayoritario
Convencional	500	Gases 5 seg	Condensados y char
Rápida	400-800	Gases <2 seg	Condensados
Instantánea	>600	Gases <0,5 seg	Gases e hidrocarburos ligeros

Fuente: ROY, Poritosh y DIAS, Goretty. Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. En: Renewable and sustainable energy reviews. [ScienceDirect]. Septiembre 2017. Vol. 77. p. 59-69. ISSN 1364-0321. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304719

La formación de hidrógeno se ve favorecida en la pirolisis rápida o instantánea utilizando altas temperaturas y tiempos de residencia cortos. Para incrementar el rendimiento de hidrógeno a partir de la pirolisis rápida, la reacción de desplazamiento agua-gas es aplicada. De acuerdo con Bridgwater³⁵ otros de los parámetros importantes son el tipo de catalizador (preferiblemente catalizadores de níquel), temperatura, tasas de calentamiento y tiempo de residencia teniendo en cuenta el tipo de reactor y el método de transferencia de calor. De este proceso se generan dos corrientes de subproductos, unos solubles en agua que son usados para la producción de hidrógeno y los insolubles en agua que se usan para la producción de adhesivos.

2.1.4 Gasificación. Como lo afirma Mohamed³⁶, es un proceso en el cual el carbón o la biomasa (madera, papel, residuos sólidos o aserrín) en un reactor bajo condiciones de presión, alta temperatura (700-850°C) y en presencia de aire son convertidos en componentes gaseosos luego una serie de reacciones químicas genera gas de síntesis del cual se extrae y se purifica el hidrógeno obteniéndose además monóxido de carbono y dióxido de carbono, vapor de agua y metano.

De acuerdo con Patra³⁷, la producción de hidrógeno tiene diferentes eficiencias por el presente método dependiendo de combustible de la biomasa, tipo de

³⁵ BRIDGWATER A.V. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. En: Journal of analytical and applied pyrolysis. [ScienceDirect]. Julio 1999. Vol 51. p. 3-22. ISSN 0165-2370. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237099000054

³⁶ HAMAD, Mohamed A. Hydrogen rich gas production from catalytic gasification of biomass. Renewable Energy. [ScienceDirect]. Enero 2016. Vol 85. p. 1290-1300. ISSN 0960-1481. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115301786

³⁷ PATRA Tapas, NIMISTRA, K; Y SHETH, Pratik. A comprehensive dynamic model for downdraft gasifier using heat and mass transport coupled with reaction kinetics. En: Energy. [ScienceDirect].

gasificador y agente de gasificación (aire, oxígeno, oxígeno enriquecido con aire); según Fernández³⁸, a partir del carbón es más caro que cuando se utiliza gas natural debido a la relación entre hidrógeno-carbono que para el gas natural es de 4:1 y en el carbón es de 0,8:1 además generar emisiones significativas. Como indica Shayan³⁹, se ha demostrado teóricamente que la generación de hidrógeno obtiene valores más altos cuando se emplea el papel como combustible y vapor como agente gasificador adicionalmente que un incremento en la temperatura afecta negativamente la producción. En la siguiente tabla se muestran algunos de los combustibles utilizados y las condiciones del proceso:

Cuadro 4. Combustibles empleados en la gasificación.

Biomasa	Temperatura (°C)	Catalizador	Resultados
Aguas residuales	900	-	Gasificación de vapor genera más singas, hidrógeno, energía y eficiencia térmica
Aserrín	600, 670, 710	-	La relación CaO/biomasa de 2 incrementa el rendimiento de hidrógeno y la concentración a temperaturas hasta 670°C
Aserrín de pino	650-800	Dolomita	Incremento en la temperatura aumenta el contenido de H ₂ en el gas seco
Plástico	700-1000	K ₂ CO ₃	Aumento en la temperatura favorece el rendimiento en la producción de H ₂
Palma residual	600-900	-	Incremento en la temperatura aumenta el rendimiento de energía y el valor de calentamiento
Residuos de leguminosas	750-850	Caliza, dolomita y olivino	Aumento en la temperatura mejora el rendimiento en H ₂ y disminuye CO y CH ₄ . La dolomita presenta mejor actuación.

Fuente: PARTHASARATHY, Prakash y NARAYANAN, Sheeba. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review. En: Renewable Energy. [ScienceDirect]. Junio 2014. Vol 66. p 570-579. ISSN 0960-1481. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113007027

Se han realizado algunos estudios para evaluar la viabilidad de utilizar el gas de síntesis generado en el proceso de gasificación en las celdas de combustible de óxido sólido de alta temperatura (SOFCs) específicamente las cuales prometen

Diciembre 2016. Vol 116. No.1. p. 1230-1242. ISSN 0360-5442. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216314578

³⁸ FERNANDEZ, Clara. Energética del hidrógeno: contexto, estado actual y perspectivas de futuro. [Repositorio Digital]. Trabajo de grado Ingeniera Industrial. Universidad de Sevilla. Facultad de Ingeniería. Sevilla 2005 p. 35. [Consultado 2, marzo, 2018]. Disponible en bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/fichero/3.1+Producci%C3%B3n+de+Hidr%C3%B3geno.pdf

³⁹ SHAYAN,E., ZARE,V; y MIRZAEI,I. Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents.En: Energy Conversion and Management. [ScienceDirect]. Marzo 2018. Vol 159. p. 30-41. ISSN 0196-8904. [Consultado 2, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417312554

ser altamente eficientes y con conversión de sostenibles entre las que se han obtenido eficiencias eléctricas entre 42-48% como lo muestra el estudio realizado por Din⁴⁰.

2.1.5 Electrólisis. Es el mejor método conocido para la producción de hidrógeno puro en pocas cantidades; esta es una técnica desarrollada desde el año 1820 por M. Faraday en la que se produce la disociación de la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno por el paso de una corriente eléctrica como lo indica Carvajal⁴¹, para esta reacción el ánodo y el cátodo donde se forma el hidrógeno se encuentran en solución. Es usual que se le adicionen sales como hidróxido de potasio para mejorar la velocidad de la reacción y se realiza bajo condiciones ambiente, según Fernández⁴² su eficiencia es dependiente de la energía eléctrica utilizada por ende llega a estar en promedio entre el 25-45%.

En la actualidad, la electrólisis se desarrolla por medio de varias vías, alcalina, membranas poliméricas o de intercambio de protones (PEM) y celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC). Como lo afirma Zeng⁴³, las membranas poliméricas funcionan como una celda de combustible que utiliza las mismas reacciones electroquímicas funcionando inversamente por lo tanto el consumo energético es el mismo pero su eficiencia es menor que las obtenidas por vía alcalina (48,5-65,5%⁴⁴). Las celdas SOEC a pesar de que tienen mejor eficiencia tiene algunas desventajas como la corrosión, problemas de sellado y migración de cromo.

De acuerdo con Kalamaras⁴⁵ este proceso no genera gases tóxicos para el ambiente pues el oxígeno puede ser utilizado en diferentes aplicaciones

⁴⁰ DIN, Zia y ZAINAL, Z. Biomass Integrated gasification–SOFC Systems: Technology Overview. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Enero 2016. Vol 53. p. 1356-1376 ISSN 1364-0321. [Consultado 2, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115009831

⁴¹ CARVAJAL, Hernan Y BABATIVA, Jhon. Estudio sobre producción de H2 con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. En: Ingeniería y Competitividad [Google Académico]. Diciembre 2009. Vol 12. No 1. p. 31-42. ISSN 0123-3033 [Consultado 4, febrero, 2018] Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323517003>

⁴² FERNANDEZ. Op. cit 96.

⁴³ ZENG Kai Y ZHANG Dongke. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. En: Progress in Energy and Combustion Science. [ScienceDirect]. Junio 2010. Vol 36. No. 3 p. 307-326. ISSN 0360-1285. [Consultado 2, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000598

⁴⁴ Ibid. p. 311

⁴⁵ KALAMARAS, Christos y EFSTATHIOU, Angelos. Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. En: Conference Papers in Energy. [Google Académico]. Marzo

industriales pero comparado con otros métodos de producción de hidrógeno es una tecnología altamente exigente en energía por lo que tiene el mayor costo en energía eléctrica. Según Holladay⁴⁶ se han estado promoviendo la investigación en células alcalinas a alta presión de mejor eficiencia y el uso de energía eléctrica proveniente de energías renovables para ser utilizada en la electrolisis y con esto hacerla más rentable para poderla usar en pilas de combustible pues los electrolizadores usados en el proceso pueden ser reducidos en tamaño para adaptarse a los vehículos de celda de combustible.

Sin embargo, los métodos anteriormente mencionados presentan una gran desventaja en comparación con los procesos biológicos: las temperaturas requeridas para llevar a cabo las reacciones son excesivamente altas (ver Cuadro 5) en comparación con las temperaturas empleadas en los procesos biológicos, las cuales pueden encontrarse en un rango entre 18°C y 40°C. La electrólisis, aunque no necesita de altas temperaturas sí demanda una gran cantidad de energía eléctrica.

Cuadro 5. Ventajas y desventajas de los procesos convencionales para la producción de hidrógeno

PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	T [°C]	REF
Reformado con Vapor	Menos costoso en comparación con los demás, razón por la cual es el más utilizado actualmente	Baja eficiencia del proceso cuando hay presencia de hidrocarburos pesados. Implica regeneración de catalizadores	520°C	47
Pirólisis	Obtención de productos secundarios útiles en función de la tecnología de tratamiento que se utilice	Existe posibilidad de desactivación del catalizador. Obtención de CO ₂ como subproducto	600°C	48

2013. Vol. 2013. p. 9. ISSN 690627. [Consultado 2, febrero, 2018]. Disponible en <https://www.hindawi.com/journals/cpis/2013/690627/cta/>

⁴⁶ HOLLADAY. Op. cit 247.

⁴⁷ KARIMIPOURFARD, D., KABIRI, S., & RAHIMPOUR, M. Op. cit. p. 137.

⁴⁸ ALVAREZ, Jhon, et al. Hydrogen production from biomass and plastic mixtures by pyrolysis-gasification. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Julio 2014. Vol 39. No. 21 p. 10883-10891. ISSN 0360-3199. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000598

Cuadro 5. (Continuación)

Gasificación de biomasa	Posibilidad de emplear residuos carbonosos como materia prima del proceso. Empleo de materia prima renovable	Se obtiene como producto un gas combustible de bajo poder calorífico. Dificultades operacionales por variación de la materia prima	800 - 900°C	49
Electrólisis	Una de las tecnologías más desarrolladas hasta el día de hoy	Altamente costoso por el alto consumo de energía eléctrica. Baja eficiencia. Desgaste y corrosión de los electrodos.	Ambiente	50

Fuente: El Autor

Según Wu⁵¹ el reformado con vapor es el método comercial más empleado en la actualidad para la obtención de hidrógeno a través de la producción de gas de síntesis (CO₂ y H₂). Este método emplea principalmente gas natural (con alto contenido de metano), y en menor cantidad naftas livianas y gas licuado como materia prima; y un gran número de etapas como la desulfuración de los gases, el reformado con vapor, la reacción catalítica vapor de agua-gas y la purificación del hidrógeno empleando una unidad de adsorción por presión oscilante (PSA, *pressure swing adsorption*). Según Karimipourfard⁵², desde el punto de vista económico, el reformado con vapor es la opción más económica para la producción de hidrógeno por encima de las otras opciones (ver Tabla 1); sin embargo, desde el punto de vista técnico no es la opción más conveniente por la cantidad y complejidad de sus etapas. Por esta razón, métodos como la gasificación de biomasa y la pirólisis se siguen empleando aunque su costo de producción sea más elevado y las temperaturas requeridas para llevar a cabo las reacciones sean más altas.

De acuerdo con Chanda⁵³, incluso la electrólisis, el método más antiguo de todos, ha sido desplazado por los procesos termo-químicos. Si bien su temperatura de

⁴⁹ SEAL, Diptendu et al. Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review. En: Renewable and sustainable energy reviews. [ScienceDirect]. Septiembre 2008. Vol 12. No. 7 p. 1909-1927. ISSN 1364-0321. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000482

⁵⁰ HOLLADAY, J. Op., cit. p. 248

⁵¹ WU, C et al. Hydrogen production via catalytic steam reforming of fast pyrolysis bio-oil in a two-stage fixed bed reactor system. En: Fuel processing technology. [ScienceDirect]. Diciembre 2008. Vol 89. No. 12 p. 1306-1316. ISSN 0378-3820. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382008001525

⁵² KARIMIPOURFARD, D. et al. Op. cit. p.138.

⁵³ CHANDA, Debabrata et al. Synthesis and characterization of NiFe₂O₄ electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction in alkaline water electrolysis using different polymer binders, En:

proceso está muy por debajo de la temperatura requerida por los procesos termo-químicos, su elevado costo y baja eficiencia la hacen una opción poco atractiva. No obstante, esto no ha sido un obstáculo para algunos investigadores que han centrado sus esfuerzos en desarrollar alternativas que permitan aumentar su eficiencia y disminuir su costo de producción haciéndolo competitivo nuevamente. Según Hoon⁵⁴, las tecnologías HTSE (*high-temperature steam electrolysis*, electrólisis de vapor a alta temperatura) y AWE (*alkaline water electrolysis*, electrólisis de agua alcalina), por nombrar algunas, están siendo estudiadas en la actualidad debido a que pueden producir mejores eficiencias.

Tabla 1. Análisis de costos de los métodos para la producción de hidrógeno

MÉTODO	EFICIENCIA	COSTO DE PRODUCCIÓN
Reformado con Vapor	83%	\$0.75/kg (sin separación del CO ₂)
Oxidación Parcial	70-80%	\$1.39/kg
Pirólisis	70-80%	\$1.21-2.19/kg
Gasificación de biomasa	40-50%	\$1.21 – 2.42/kg
Electrólisis	25%	\$2.56-2.97/kg

Fuente: PARTHASARATHY, Prakash y NARAYANAN, Sheeba. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review. En: Renewable Energy. [ScienceDirect]. Junio 2014. Vol 66. p 570-579. ISSN 0960-1481. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113007027

2.2 PROCESOS BIOLÓGICOS O NO CONVENCIONALES

Los procesos biológicos se caracterizan fundamentalmente porque involucran microorganismos vivos como bacterias y hongos, o sus componentes celulares, para generar productos como la cerveza y los antibióticos, o servicios como la biorremediación o el tratamiento de efluentes.

Como lo afirma Tasri⁵⁵, la producción de hidrógeno a través de estos métodos ha atraído cada vez más atención entre los investigadores debido a su versatilidad

Journal of power sources. [ScienceDirect]. Julio 2015. Vol 285. p. 217-226. ISSN 0378-7753. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315004838

⁵⁴ HOON, Sung et al. High-activity electrodeposited NiW catalysts for hydrogen evolution in alkaline water electrolysis. En: Applied surface science. [ScienceDirect]. Septiembre 2015. Vol 349. p. 629-635. ISSN 0169-4332. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433215011587>

⁵⁵ TASRI, Adek Y SUSILAWATI, Anita. Op. cit., p. 37

para ser aplicado empleando diferentes fuentes de carbono, entre las cuales se pueden mencionar desperdicios orgánicos y aguas residuales provenientes de procesos industriales. Por otro lado, al emplear desechos industriales ayuda a disminuir la contaminación ambiental generada por dichos desechos, reduciendo los problemas por disposición de efluentes y residuos sólidos.

Según Bedoya⁵⁶, en comparación con otros procesos, la producción de hidrógeno por fermentación presenta ventajas notables que lo hacen un proceso prometedor: su bajo costo y simplicidad y aprovechamiento de materias primas renovables y económicas son algunas de estas. Además, los procesos biológicos consumen menor cantidad de energía que los procesos termo-químicos y electro-químicos pues pueden llevarse a cabo a temperatura y presión cercana a la ambiental⁵⁷. A continuación se exponen brevemente algunos de los procesos biológicos que están siendo estudiados y desarrollados alrededor del mundo

2.2.1 Biofotolisis directa. Emplea la energía solar y el sistema fotosintético de las algas y algunas bacterias para convertir agua en energía química, hidrógeno y oxígeno molecular. Como lo afirma Melis⁵⁸, para este se requieren microorganismos que se encuentran en las algas verdes los cuales necesitan de un periodo de tiempo de incubación anaerobia en la oscuridad para provocar la actividad de las enzimas hidrogenasas reversibles e irreversibles necesarias para el metabolismo del hidrógeno.

De acuerdo con Hallenbeck⁵⁹, los requerimientos de las condiciones para este proceso son muy estrictas pues las enzimas Fe-hidrogenasas son muy sensibles

⁵⁶ BEDOYA, Andrea; CASTRILLÓN, Juan Camilo; RAMÍREZ, Juan Esteban; VÁSQUEZ, Juan Esteban y ARIAS, Mario. Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. En: Revista Universidad Nacional de Colombia. [Google Académico]. 2007. Vol. 75. No. 154. p. 137-157. ISSN 2346-2183. [Consultado 6, febrero, 2018]. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1723>

⁵⁷ ROSALES, Luis, GARCÍA, Raul; Y DE LEÓN RODRÍGUEZ, Antonio. Estimation of hydrogen production in genetically modified E. coli fermentations using an artificial neural network. En: International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2010. Vol 35. No 24. p. 13186-13192. ISSN 0360-3199. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910017763

⁵⁸ MELIS, Anastasios y HAPPE, Thomas. Hydrogen production. green algae as a source of energy. En: Plant physiology. [Google Académico]. Noviembre 2001. vol. 127, No. 3, p. 740-748.

⁵⁹ HALLENBECK, Patrick Y BENEMANN, John. Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes. En: International Journal of Hydrogen Energy, [ScienceDirect]. Diciembre 2002. Vol 27. No 12. p. 1185-1193. ISSN 0360-3199. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319902001313

al oxígeno lo cual ha sido una de sus desventajas pues requiere presiones parciales de oxígeno gaseoso menor al 0,1%, para resolver este inconveniente se han realizado estudios en los que se emplean absorbentes de O₂ irreversibles (glucosa) y reversibles (hemoglobina) pero esto reduce considerablemente la eficiencia de proceso y no es práctico. También a través de mutagénesis clásica se han encontrado algunos casos exitosos de resistencia al oxígeno en algas *Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus obliquus*, *Chlorococcum littorale*, *Platymonas subcordiformis* y *Chlorella fusca*, como lo indican Seibert⁶⁰ y Winkler⁶¹ o el uso de cianobacterias heterocísticas que poseen dos tipos de células diferentes que permiten la generación de hidrógeno catalizada por nitrogenasas y de oxígeno de forma separada. Sin embargo, así se logren superar estas dificultades este proceso tiene grandes limitaciones en cuanto a los grandes volúmenes que requieren los fotobiorreactores y la separación de hidrógeno y oxígeno que lo hacen poco práctico pero a pesar de esto presenta algunas ventajas como no necesitar ningún sustrato de carbono orgánico y no genera emisiones efecto invernadero.

2.2.2 Biofotólisis indirecta. Llevada a cabo por cianobacterias del género *Nostoc*, *Anabaena*, *Calothrix*, *Oscillatoria* y algas verde – azuladas. A partir del proceso fotosintético el CO₂ es fijado en sustratos ricos en hidrógeno dando lugar posteriormente a hidrógeno molecular. Como indica Chen⁶², consta de dos etapas: en la primera las cianobacterias y/o algas promueven su crecimiento formando carbohidratos; en la segunda, estos carbohidratos son empleados como sustrato para la producción de hidrógeno a través de un proceso de fermentación oscura anaeróbica. Durante este proceso existen varias enzimas fundamentales, nitrogenasa la cual cataliza la producción de hidrógeno durante la fijación del nitrógeno, la hidrogenasa captadora que oxida el hidrógeno y las hidrogenasas bidireccionales que pueden oxidar y sintetizar el hidrógeno. De acuerdo con

⁶⁰ SEIBERT, M.; FLYNN, T. Y. y GHIRARDI, M. L. - Strategies for Improving Oxygen Tolerance of Algal Hydrogen Production. [ScienceDirect]. Oxford: Pergamon. 2001. p. 67-77 ISBN 9780080439471. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780080439471>

⁶¹ WINKLER, Martin, et al. [Fe]-Hydrogenases in Green Algae: Photo-Fermentation and Hydrogen Evolution Under Sulfur Deprivation. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2002. Vol 27. No 12. p. 1431-1439. ISSN 0360-3199. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319902000952

⁶² CHEN, X. Op., cit., p.549.

Das⁶³, algunas culturas requieren dióxido de carbono durante la fase de producción de hidrógeno, bajas concentraciones de CO₂ (4-18%p/v) incrementa la densidad celular en la fase de crecimiento lo que se traduce en mayor cantidad de hidrógeno en las etapas posteriores.

Para este método, al igual que en la fotólisis directa es necesario remover el oxígeno pues es un inhibidor de las enzimas hidrogenasas y nitrogenasas y las bajas tasas en producción de hidrógeno han disminuido el interés en dicho proceso.

2.2.3 Fotofermentación. Como lo afirma Azwar⁶⁴, es un proceso fermentativo producido por bacterias fotosintéticas que usan luz solar como energía para convertir compuestos orgánicos en hidrógeno y dióxido de carbono. Según Hallenbeck⁶⁵, es catalizado por enzimas nitrogenasas bajo condiciones de insuficiencia de nitrógeno también se encuentra involucrada la hidrogenasa captadora de hidrógeno compite por el H₂ disponible en el medio, reduciendo la actividad nitrogenasa al quedar sin sustrato.

De acuerdo con Kadpan⁶⁶, una de las variables más importantes es la intensidad de la luz pues un incremento de esta se ve que afecta la velocidad de producción y el rendimiento del hidrógeno. Una de las principales ventajas de este proceso de producción es que se pueden utilizar una gran variedad de sustratos orgánicos los cuales pueden ser obtenidos de corrientes residuales así como también agrícolas e industriales en procesos tipo batch, continuos, o inmovilizados utilizando diferentes matrices solidas como agar gel, vidrio poroso y espuma de poliuretano.

⁶³ DAS, Debabrata y VEZIROGLU, T. Nejat. Advances in Biological Hydrogen Production Processes. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2008. Vol 33. No 21. p. 6046-6057. ISSN 0360-3199. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990800918x

⁶⁴ AZWAR, M. Y.; HUSSAIN, M. A. y ABDUL-WAHAB, A. K. Development of biohydrogen production by photobiological, fermentation and electrochemical processes: A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. . [ScienceDirect]. Marzo 2014. Vol 31. p. 158-173. ISSN 1364-0321. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007715

⁶⁵ ABO-HASHESH, M., DESAUNAY, N., & HALLENBECK, P. High yield single stage conversion of glucose to hydrogen by photofermentation with continuous cultures of *Rhodobacter capsulatus* JP91. En: Bioresource Technology. [ScienceDirect]. Enero 2013. Vol 128. p. 513-517. ISSN 0960-8524. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412015933

⁶⁶ KAPDAN, I., Y KARGI, F. Op., cit., p.670.

Como lo indica Hallenbeck⁶⁷, a pesar de las investigaciones desarrolladas en este proceso, todavía tiene diversas limitantes como el bajo volumen de producción, baja conversión de energía solar, requiere fotobiorreactores con gran área expuesta a la luz solar y la alta demanda de energía por las enzimas nitrogenasas.

2.2.4 Fermentación Oscura. Según Holladay⁶⁸, el proceso de fermentación oscura generalmente utiliza bacterias anaerobias (aunque pueden utilizarse algunos tipos de algas también), sustratos ricos en carbono y como su nombre lo indica, ausencia de luz. La producción de hidrógeno por este método ha sido reportada como uno de los métodos más eficientes y viables a partir de una amplia gama de sustratos, particularmente fuentes renovables ricas en materia orgánica como vinazas, lodos, lixiviados, pulpas, tallos y bagazo como lo indica Reungsang⁶⁹. Debido al costo y las preocupaciones ambientales, los desperdicios orgánicos son una buena opción de sustrato frente a sustratos de compuestos puros como azúcares o almidón. De acuerdo con Meng⁷⁰, gracias a estas características, este método permite que la fermentación oscura pueda integrarse a sistemas de tratamiento de aguas residuales tanto para la producción de hidrógeno como para el tratamiento de estas. En el siguiente cuadro se muestran algunos de las cepas que han sido estudiadas junto con algunos parámetros de operación y los resultados obtenidos:

⁶⁷ HALLENBECK, Patrick C. y GHOSH, Dipankar. Advances in Fermentative Biohydrogen Production: The Way Forward? . En: Trends in Biotechnology. [ScienceDirect]. Mayo 2009. Vol 27. No.5 p. 287-297. ISSN 0167-7769. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779909000572

⁶⁸ HOLLADAY, J. et al. Op., cit., p. 248

⁶⁹ REUNGSANG, Alissara et al. Production of biohydrogen from hydrolyzed bagasse with thermally preheated sludge. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Septiembre 2009. Vol 34. No.18. p. 7612-7617. ISSN 0360-3199. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909010957

⁷⁰ MENG, Y., WU, T. & CHING J. (2014). A review of sustainable hydrogen production using seed sludge via dark fermentation. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Junio 2014. Vol 34. p. 471-482. ISSN 1364-0321. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001658

Cuadro 6. Variables en el proceso de fermentación oscura.

PROCESOS POR LOTES PARA FERMENTACIÓN OSCURA CULTIVOS PUROS						
Microorganismos	Sustrato	pH	T (°C)	RESULTADOS		
				Productividad H ₂ (ml/h)	Rendimiento H ₂ (mol H ₂ /mol sustrato)	Otros productos
<i>Clostridium butyricum</i> CGS5	Sacarosa	5.5	37	163	2.78 mol /mol sacarosa	Acetato, propionato y butirato
<i>Clostridium pasteurianum</i>	Almidón	8	35	18	194 ml/g almidón	Acetato, propionato y butirato
<i>Clostridium saccharoperbutyl acetonicum</i>	Suero de leche	6	30	47.07	2.8 mol/mol lactosa	Acetato, propionato y butirato
<i>Clostridium thermocellum</i> 27405	Fibras de madera (DLWs)	6.9-7.1	NI	NI	1.6 mol/mol glucosa	Acetato, etanol, lactato y formato
<i>Clostridium butyricum</i> , <i>Enterobacter aerogenes</i> y <i>Rodhobacter sp.M19</i>	Residuos de almidón de papa	7.5	35	NI	7mol/mol glucosa	NI
<i>E. coli</i>	Glucosa	6.8	30	52	2.4 mol/mol glucosa	Ácido valérico
<i>E. coli</i>	Glucosa		37	NI	2 mol/mol glucosa	NI
<i>E. coli</i> MC13-4	Glucosa		37	10	1.27 mol/mol glucosa	Ácido acético y etanol

Fuente: BEDOYA, Andrea; CASTRILLÓN, Juan Camilo; RAMÍREZ, Juan Esteban; VÁSQUEZ, Juan Esteban y ARIAS, Mario. Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. En: Revista Universidad Nacional de Colombia. [Google Académico]. 2007. Vol. 75. No. 154. p. 137-157. ISSN 2346-2183. [Consultado 6, febrero, 2018]. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1723>

Sin embargo presenta algunas limitaciones que son objeto de estudio hoy en día, según Kovacs⁷¹: la ruta metabólica es dependiente del tipo de cepa y los rendimientos de hidrógeno son muy variados, además, el proceso de fermentación produce ácidos orgánicos y alcoholes de bajo peso molecular los cuales pueden disminuir el rendimiento de hidrógeno desviando la ruta metabólica hacia la

⁷¹ KOVACS, Kornel , MAROTI, Gergely; Y RAKHELY, Gabor. A novel approach for bio-hydrogen production. En: International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Septiembre 2006. Vol 31. p. 1460-1468. ISSN 0360-3199. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319906002163

producción química orgánica. A su vez, estos sub-productos representan un residuo contaminante al momento de su vertimiento y disposición por lo que es necesario un tratamiento de aguas residuales posterior al proceso, o separarlos para poder ser aprovechados; de cualquier forma, las dos opciones añaden costos y complejidad al sistema.

Los procesos biológicos son una fuente renovable, abundante y disponible en la mayoría de los casos, en el siguiente cuadro se muestran las eficiencias y los costos de producción de hidrógeno en cada uno de estos procesos. Es importante observar que la fermentación oscura es uno de los procesos con mejor potencial para la producción de hidrógeno comparado con otros métodos de producción debido a que a pesar de que tiene uno de los costos más altos la eficiencia que maneja el proceso es muy superior.

Cuadro 7. Eficiencias y costos de producción para procesos biológicos de producción de H₂

Proceso	Eficiencia	Costo hidrógeno(\$/Kg)
Fotólisis directa	10	2,13
Fotólisis indirecta	-	1,42
Fotofermentación	0,1	2,57
Fermentación oscura	60-80	2,83

Fuente: RAHMAN, S. et al. Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology. En: Renewable and sustainable energy reviews.[ScienceDirect]. Diciembre 2016. Vol. 66. p. 137-162. ISSN 1364-0321. [Consultado 26, enero, 2018]. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116303756>

El hidrogeno gaseoso obtenido a partir de procesos biológicos aun no es comercial para su aplicación en celdas de combustible debido principalmente a sus altos costos y los estudios son limitados entre los cuales se pueden mencionar algunos como Chader *et al.* Quien a partir de algas verdes o Lin *et al.* que a través de fermentación oscura han logrado suministrar hidrógeno a una celda PEMFC.

El tamaño de los reactores también es un factor muy importante para observar la aplicabilidad que tienen los procesos biológicos en línea con las celdas de combustible. En algunos sistemas biológicos se hace necesaria la construcción de reactores muy grandes para almacenar cierta potencia de la celda lo que lo convierte en un sistema poco práctico y de difícil transportación. En los sistemas de fotofermentación utilizando las bacterias *Rhodobacter sphaeroides ZX-5* se calculó que para almacenar una potencia de 5W es necesario un volumen de reactor de 26,3 L mientras que para 100W se necesitaría un reactor de 526L⁷², sin

⁷² Wang, Xueqing. et al.Enhanced photo-fermentative hydrogen production by *Rhodobacter capsulatus* with pigment content manipulation. En: Bioresource technology. [ScienceDirect]. Agosto 2012. Vol 118. p. 490-495. ISSN 0960-8524. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412008516

embargo la fermentación oscura podría un mejor candidato para la producción de energía, un estudio realizado por Cheng *et al*⁷³. utilizando *Clostridium butyricum* CGS2 es posible almacenar 1kW en un reactor de 1000L .

El desempeño de la celda está relacionado con el flujo de hidrógeno en la entrada, lo cual depende de los rendimientos y la velocidad de producción de hidrógeno. La fermentación oscura una vez más demuestra ser una buena opción debido a que puede producir suficiente hidrógeno para las celdas de combustible por ejemplo en un estudio realizado por Lin *et al*⁷⁴. se mantuvo estable la producción de hidrógeno en 1.15L/hL durante 300 días de lo cual genero un voltaje de 2.28V y una potencia de 0.87W.

⁷³ CHEN,Shing-Der, et al. Sequencing batch reactor enhances bacterial hydrolysis of starch promoting continuous bio-hydrogen production from starch feedstock. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Octubre 2009. Vol 34. No.20 p. 8549-8557. ISSN 0360-3199. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909013159

⁷⁴ LIN,Chi-Neng, et al. Integration of fermentative hydrogen process and fuel cell for on-line electricity generation. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Mayo 2007. Vol. 32. No. 7. p. 802-808. ISSN 0360-3199. [Consultado 13, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319906004733.

3 TECNOLOGÍAS PARA USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

Actualmente debido a la preocupación por el cambio climático y el agotamiento de los combustibles de origen fósil, el interés hacia el desarrollo de nuevas tecnologías amigables con el ambiente se está incrementando cada vez más. Bajo este panorama aparecen las pilas de combustible las cuales pueden tener gran importancia en el futuro energético por su capacidad de generar electricidad sin emitir gases contaminantes como una herramienta para cambiar el actual consumo de combustibles fósiles. Una de las características más importantes de este tipo de tecnología es que a diferencia de una batería convencional que almacena electricidad, las pilas de combustible son capaces de producirla siempre y cuando se esté suministrando combustible y aire.

De acuerdo con Aguer⁷⁵, las células de combustible son dispositivos electroquímicos directos de energía que transforma la energía química en energía eléctrica que para alcanzar tensiones elevadas se deben unir varias células en serie constituyendo una unidad denominada <stack> pero que además necesita elementos para la evacuación de gases inertes, refrigeración, entre otros, que en su conjunto con varias células de combustible forman lo que se denomina pilas de combustible. No poseen partes móviles por lo que son muy silenciosas y una fuente de producción de electricidad, calor y agua.

3.2 COMPONENTES BASICOS

Las celdas de combustibles están compuestas principalmente por las partes descritas a continuación:

- **Electrodos:** es el espacio donde ocurren las reacciones químicas; su material debe ser electrocatalítico para aumentar la velocidad de reacción de transferencia y poroso para incrementar el área sobre la cual ocurre la reacción. El ánodo es el polo negativo, se encarga de distribuir el hidrógeno en la superficie del catalizador, los iones positivos se dirigen hacia el cátodo a través del electrolito mientras que se envían los electrones desde el hidrógeno hasta el circuito exterior y producen energía eléctrica. El cátodo es el polo positivo de la célula en donde se distribuyen las moléculas de oxígeno sobre el catalizador para la producción de agua cuando se unen con los electrones que vienen por el circuito externo.
- **Electrolito:** transporta los iones positivos de hidrógeno hacia el cátodo además de servir como una barrera para evitar que el combustible y el oxidante se

⁷⁵ ARGUER, Miguel Y MIRANDA, Luis. El Hidrogeno: Fundamento de un futuro equilibrado. [Google Académico]. 2 Ed. Madrid: Ediciones Diaz de Santos. 2012. p.107. ISBN 978-84-9969-078-0. [Consultado 3, marzo, 2018].

mezclen. Puede ser sólido, líquido o gaseoso y clasifica las celdas de combustible según el tipo de electrolito usado.

- Combustible: en las celdas de combustible pueden ser hidrocarburos ligeros, gas natural y el hidrógeno siendo este último el de mayor interés por su alto contenido de energía.
- Catalizadores: son utilizados para aumentar la velocidad de reacción algunas celdas de combustible de baja temperatura utilizan catalizadores hechos de metales nobles lo cual es un inconveniente por los altos costos por ejemplo en el caso del platino.
- Oxidante: se utiliza el oxígeno como gas oxidante el cual ingresa por el cátodo y no es necesario de que venga en estado puro.

3.3 FUNCIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible está compuesta básicamente de un electrolito que actúa como una membrana semipermeable que permiten atravesar su estructura pero no conducen electrones, dos electrodos donde brindan un espacio para que las moléculas de combustible sean adsorbidas y los iones puedan pasar hacia adentro o afuera durante la reacción y un catalizador que es utilizado para acelerar la velocidad de reacción.

Durante el proceso según Chang⁷⁶, el hidrógeno que llega al ánodo catalizador se disocia en protones y electrones, los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, debido al aislamiento eléctrico los electrones pasan por un circuito externo liberando energía. En el catalizador del cátodo, las moléculas de oxígeno reaccionan con los protones y electrones formando agua. La energía química en el enlace del hidrógeno se transforma en energía eléctrica y vapor de agua.

La producción de energía eléctrica se mantendrá en forma continua en la medida en que se estén alimentando los elementos necesarios, esta producción es exotérmica por lo cual se requiere retirar el calor para mantener optimizar la eficiencia de la celda y no degradar el electrolito.

⁷⁶ CHANG,Wei-Ru; HWANG,Jenn-Jiang y WU,Wei. Environmental impact and sustainability study on biofuels for transportation applications. En: renewable and sustainable energy reviews. [ScienceDirect]. Enero 2017. Vol. 67.. p. 277-288. ISSN 1364-0321. [Consultado 23, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305123

De acuerdo con Ball⁷⁷, a diferencia de los motores de combustión interna los cuales están regidos por el ciclo de Carnot y limitados por la temperatura, la eficiencia de las pilas de combustible está dada por las leyes de Faraday lo cual representa una de sus mayores ventajas pues se relaciona la corriente producida con la cantidad de material reactivo y les permite alcanzar eficiencias más altas, mientras en un motor Diesel las eficiencias están entre el 25 al 30% mientras que en los modelos de automóvil de pilas de combustible alimentadas con hidrógeno tiene una eficiencia alrededor del 70%.

La curva de polarización (ver Gráfica 1) es una gráfica que muestra la eficiencia generada por una pila de combustible relacionando la potencia real y la corriente que la atraviesa para todo rango de operación en la cual se divide en tres regiones según Umberto⁷⁸ (región de activación, óhmica y de concentración) que están asociadas a un tipo de pérdida de energía por lo cual la potencia alcanzada siempre será menor a la ideal, a continuación se explicaran cada una de estas pérdidas como indica Martínez⁷⁹:

- Pérdidas por activación: esta zona representa la energía necesaria para que se dé la reacción electroquímica en la superficie del catalizador, estas pérdidas son dependientes de las reacciones, el catalizador seleccionado, condiciones de operación como la temperatura y en menor medida la presión y la disminución de la densidad de corriente. Son la principal causa de caída de voltaje.
- Pérdida óhmica: son generadas por la resistencia al flujo de iones en el electrolito y de los electrones en el electrodo. Son proporcionales a la densidad de la corriente, del material seleccionado y la geometría de la pila de combustible, se pueden reducir aumentando la conductividad del electrolito y disminuyendo el espacio entre los electrodos.
- Pérdida de concentración: son producidas por altas densidades de corriente cuando se produce agua líquida que bloquea los poros del electrodo. La mayor

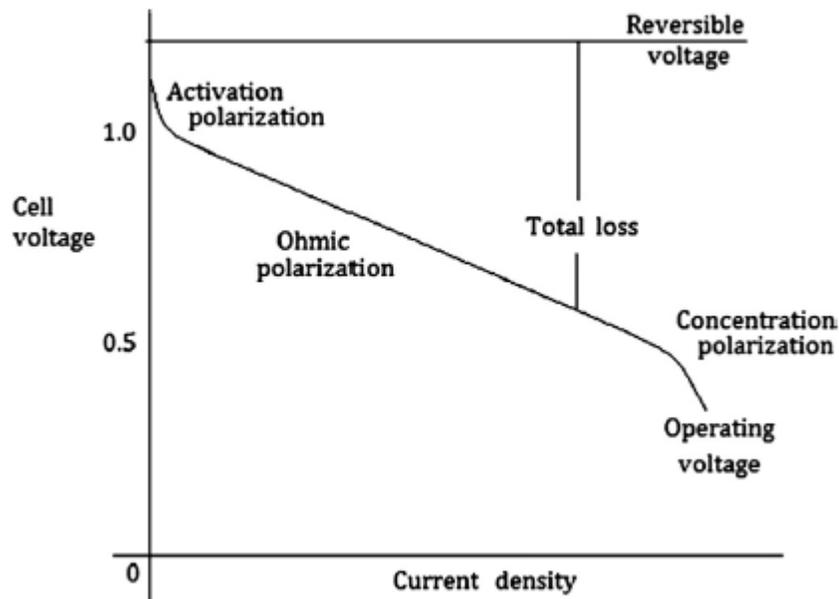
⁷⁷ BALL, Michael y WIETSCHEL, Martin. The Future of Hydrogen – Opportunities and Challenges. En International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Enero 2009. Vol. 34. No 2. p. 615-627. ISSN 0360-3199. [Consultado 25, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908015061

⁷⁸ UMBERTO, Lucia. Overview on Fuel Cells. En Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Febrero 2014. Vol. 30. p. 164-169. ISSN 1364-0321. [Consultado 25, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006965

⁷⁹ Martinez, Lucas. Termotecnia básica para ingenieros químicos: procesos termodinámicos y máquinas. 1 Ed. Cuenca: Ed. De la Universidad de Castilla-La Mancha. 2007. p.65. ISBN 978-84-8427-499-5. [Consultado 25, marzo, 2018].

contribución es el lento transporte de reactivos y productos desde la superficie de los electrodos aunque también en algunas ocasiones las impurezas que pueden ser absorbidas por el catalizador.

Gráfica 1. Curva de polarización para una pila de combustible



Fuente: UMBERTO, Lucia. Overview on Fuel Cells. En Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Febrero 2014. Vol. 30. p. 164-169. ISSN 1364-0321. [Consultado 25, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006965

Como lo afirma la Oficina De Eficiencia Energética Y Energía Renovable de Estados Unidos⁸⁰ otras variables como la temperatura y la presión afectan la curva de polarización de forma positiva en la medida en que aumente la tensión de polarización. El aumento de la temperatura favorece el comportamiento pues disminuye la resistencia interna de la celda y mejora la transferencia de masa; al aumentar la presión se incrementa la tensión de polarización pues las presiones parciales de hidrógeno y oxígeno son proporcionales a las reacciones químicas.

3.4 TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE

En esta sección se expondrá los tipos de pilas de combustible que han sido clasificados de acuerdo con el electrolito que utilizan las cuales tienen diferentes

⁸⁰ OFICINA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍA RENOVABLE –EERE-Fuel Cell Engine and Related Technologies. [SITIO WEB]. Diciembre 2001. [Consultado 27, marzo, 2018] Archivo pdf. Disponible en : [https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm04r0.pdf]

rangos de temperatura de operación que se podrían dividir en alta, por encima de 200°C usadas para generación eléctrica superior a 1 MW, y baja las cuales llegan hasta los 200°C. En las pilas de alta temperatura las reacciones oxidación-reducción se dan fácilmente por lo que no es necesario usar electrocatalizadores como en el caso de las de baja que hace incrementar sus costos pues necesitan materiales como el platino para su funcionamiento.

En el siguiente cuadro se pueden resumir algunas de sus principales características:

Cuadro 8. Características de los principales tipos de pilas de combustible

Características	Tipos de pilas				
	Membrana polimérica	Alcalina	Ácido fosfórico	Carbonatos fundidos	Óxidos sólidos
Temperatura de operación (°C)	40-80	65-220	205	605	600-1000
Potencia	20-250KW	1-100KW	200KW-1MW	250KW-3MW	300KW-300MW
Eficiencia eléctrica (%)	40-50	50-70	40-45	50-60	40-72
Electrolito	Membrana de intercambio ionico polimerica hidratada	Hidróxido de potasio movilizado o inmovilizado en una matriz de asbesto	Ácido fosfórico inmovilizado en SiC	Carbonato fundido inmovilizado en LiAlO ₂	Perovskita
Electrodos	Carbono	Platino	Carbono	Niquel y oxido de niquel	Perovskita y perovskita metalita cermet
Catalizador	Platino	Platino	Platino	Electrodo	Electrodo
Interconector	Metal o carmon	Metal	Grafito	Niquel o acero inoxidable	Niquel, cerámica o acero
Portadores de carga	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁺	O ⁻

Fuente: UMBERTO, Lucia. Overview on Fuel Cells. En Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Febrero 2014. Vol. 30. p. 164-169. ISSN 1364-0321. [Consultado 25, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006965

3.4.3 Pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC). Está compuesto por una membrana conductora de protones en medio de dos electrodos porosos cubiertos por un electrocatalizador usualmente de platino y el reverso de los electrodos esta por un material hidrofóbico que permite la difusión del gas hasta el catalizador. Según Cano⁸¹, estas pilas de combustibles tiene un

⁸¹ CANO, Ulises. Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. [SITIO WEB]. p.211. [Consultado 27, marzo, 2018] Archivo pdf.Disponible en:[<https://www.ineel.mx/reno99/apli.pdf>]

rango de temperatura bajo comparado con los otros tipos existentes lo que permite que su arranque sea más rápido al necesitar menos tiempo de calentamiento, tienen una densidad de potencia alta y el único líquido que utilizan es agua lo que genera pocos problemas por corrosión, los últimos desarrollos han permitidos que el manejo del agua sea controlado para prevenir la inundación de los electrodos manteniendo la humedad necesaria para que la membrana pueda conducir las cargas positivas.

Su desempeño depende de la temperatura, la presión, calidad de los gases, entre otros. Maneja presiones alrededor de los 30 psi para potencias hasta de 285 KW, no obstante el uso de colectores adecuados pueden brindar la posibilidad de manejar presiones hasta de 3000 psi que aumentarían el voltaje y la densidad de corriente. De acuerdo con Mekhilef⁸², La eficiencia puede verse afectada cuando se opera a temperaturas superiores a los 100°C debido a la evaporación del agua en la membrana causando deshidratación lo que lleva a la disminución de la conductividad de los protones.

Actualmente son las pilas que ofrecen mejores perspectiva para el futuro en la industria automotriz y han sido empleadas en la mayoría de prototipos construidos hasta la fecha, se pueden fabricar de una forma compacta y ligera sin embargo sus costos aún siguen siendo altos. Como lo indica Wu⁸³, los diferentes estudios realizados dan como resultado un amplio rango de tiempo de vida útil para este tipo de células: 5000 horas en carros, 20000 h en buses y 40000h de operación continua en aplicaciones estacionarias.

3.4.4 Pilas de combustible alcalinas (AFC). Fueron las primeras pilas de combustible puestas en práctica en generación eléctrica en misiones de transbordadores espaciales de la NASA. El electrolito usado es KOH concentrado cuando se usan altas temperaturas (superiores a 250°C) y entre 35 y 50% a temperaturas menores. Según McLean⁸⁴, la principal ventaja de este tipo de pilas

⁸² MEKHILEF,S.; SAIDUR,R. y SAFARI,A. Comparative Study of Different Fuel Cell Technologies. En:Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Enero 2012. Vol. 16. No 1. p. 981-989. ISSN 1364-0321. [Consultado 27, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004709

⁸³ WU, Jinfeng, *et al.* A Review of PEM Fuel Cell Durability: Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies. En: Journal of Power Sources. [ScienceDirect]. Septiembre 2008. Vol. 184. No 1. p. 104-119. ISSN 0378-7753. [Consultado 27, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775308011968

⁸⁴ MCLEAN,G. F., *et al.* An Assessment of Alkaline Fuel Cell Technology. En: International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Mayo 2002. Vol. 27. No 5. p. 507-526. ISSN 0360-3199. [Consultado 27, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319901001811

es que puede utilizar varios electrocatalizadores entre los que se puede mencionar plata, níquel, óxidos metálicos y algunos complejos de cobalto lo que afecta directamente en un costo de producción más bajo pero su principal inconveniente es que necesita el combustible altamente puro pues es extremadamente intolerante a concentraciones de CO₂ ni en el combustible ni en el oxidante lo que incrementa costos de operación.

3.4.5 Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC). Este tipo de pilas son utilizadas para generación estacionaria de potencia, hoy en día existen algunos prototipos instalados alrededor del mundo por ejemplo la central eléctrica ubicada en Tokio capaz de producir hasta 11 MW de potencia funcionando más de 40000 horas sin interrupción y ha sido una de las más desarrolladas como indica Watanabe⁸⁵. Tiene eficiencias entre el 40 y 85% si el vapor que produce se utiliza en cogeneración, el calor generado puede ser utilizado en sistemas de reformado de combustible y calefacción.

Se pueden utilizar diferentes combustibles reformados pues el CO₂ no reacciona con el electrolito dando la posibilidad de utilizarse de forma directa y aire como oxidante pero a temperaturas bajas en CO puede envenenar el catalizador de platino; el electrolito que maneja es más estable y tiene menor volatilidad lo que facilita su uso en un amplio rango de temperatura, sin embargo, el uso de un electrolito ácido hace que presente problemas de corrosión adicionalmente necesita un catalizador de platino lo que las hace costosas, otra desventaja que presenta es su gran tamaño y peso⁸⁶.

3.4.6 Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC). Están clasificadas como pilas de alta temperatura (600°C) y utilizan como electrolito carbonatos fundidos de litio y sodio retenida en una matriz de cerámica de aluminato de litio, no necesita electrocatalizadores de metales nobles lo que se convierte en ahorro de costos. Una de sus características principales es que no es necesario un proceso de reformado anterior pues permite extraer el hidrógeno del hidrocarburo dando además la posibilidad de usar combustibles como el CO, gas natural, propano y biocombustibles. Según afirma Milewski⁸⁷, la necesidad del flujo de CO y O₂ en el cátodo para recuperación y formación de iones de carbonato y el carácter corrosivo del electrolito que afecta la vida útil, son las desventajas que

⁸⁵ WATANABE, T. Fuel cell power system applications in Japan. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, [Google Académico]. Mayo 1997. Vol. 211. No 2. p. 113-119. [Consultado 27, marzo, 2018]. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.819.5189&rep=rep1&type=pdf>

⁸⁶ MEKHILEF,S.; SAIDUR,R. y SAFARI,A. Op cit. p. 983

⁸⁷ MILEWSKI, Jarosław, *et al.* Development of Molten Carbonate Fuel Cells at Warsaw University of Technology. En: Energy Procedia. [ScienceDirect]. Diciembre 2017. Vol. 142. p. 1496-1501. ISSN 1876-6102. [Consultado 29, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217363543

tiene este tipo de pilas. Han sido desarrollados prototipos a gran escala en Italia o en Japón en plantas de generación capaces de producir hasta 100MW.

3.4.7 Pilas de combustible de óxidos sólidos (SOFC). De igual forma que las pilas de carbonatos fundidos, presentan flexibilidad frente al uso de combustible pues el reformado ocurre dentro de la pila a temperaturas altas (600-1000°C) logrando eficiencias de un 85% con cogeneración, sin embargo debido a las altas temperaturas tienden a tener problemas en la durabilidad. Utiliza electrolitos de materiales cerámicos (zirconia estabilizada de ytrio o escandio) lo cual permite alcanzar temperaturas elevadas y dejar atrás problemas relacionados con corrosión y manejo de líquidos. Junto con las pilas de membrana de intercambio iónico actualmente son las más investigadas por su prometedora actividad en la estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala.

3.5 APLICACIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

3.5.3 Aplicaciones portátiles. El uso de aparatos electrónicos es cada vez mayor así como la dependencia del hombre a estar en contacto con estos, esta creciente demanda incentiva a la búsqueda de fuentes de energía que permita tener tiempos más prolongados de uso, livianos, de tamaño apropiado y de calidad, y es aquí donde las pilas de combustible de hidrógeno han surgido como una herramienta de suministro de energía la cual involucra dos mercados, los dispositivos electrónicos como celulares, computadores, entre otros y generadores de energía para dar luz al aire libre en aplicaciones puntuales como lo es la industria militar.

Las pilas de combustible en estos campos han avanzado como herramientas prometedoras en los sistemas de energía en aparatos electrónicos por las ventajas que ofrecen en cuanto a contenido de energía, recarga instantánea a través del reemplazo o recarga de un cartucho de combustible y bajas temperaturas de funcionamiento sin embargo la construcción de este tipo de pilas se hace mucho más compleja que una batería convencional lo que dificulta su miniaturización y posterior aplicación. De acuerdo con Wilberforce et al.⁸⁸ actualmente se está trabajando en sistemas microelectromecánicos y su aplicación en la fabricación de los diferentes componentes que constituyen las pilas de combustible de tipo PEM. Compañías como Horizon desde el año 2011 han comercializado cargadores USB de la línea Minipack los cuales compiten en

⁸⁸ WILBERFORCE, Tabbi et al. Advances in stationary and portable fuel cell applications. En: *International journal of hydrogen energy*. [ScienceDirect]. Marzo 2016. Vol. 41. No. 37. p. 16509-16522. ISSN 0360-3199. [Consultado 29, abril, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915315822.

costo/beneficio con las pilas convencionales capaces de generar de 1.5 a 2.5 W (5V, 400mA), con un solo cartucho se puede generar la misma cantidad de energía que 1000 baterías alcalinas desechables AA, son reciclables y no utilizan metales pesados ni líquidos tóxicos implicados.

Otra de sus aplicaciones es en la generación de energía eléctrica en áreas al aire libre para actividades como acampar o escalar, en las que se pueden utilizar en lugar de generadores diésel con esto evitar emisiones contaminantes y no causan problemas de ruido. Existe una creciente demanda en sistemas de energía tipo PEMFC para la industria militar por las características mencionadas anteriormente y además su alta potencia y energía.

3.5.4 Aplicaciones estacionarias: Las pilas de combustibles se han empleado en plantas de generación de energía eléctrica operando exitosamente en diferentes tamaños y han llamado mucho la atención debido a sus eficiencias, bajo impacto ambiental y que no depende de la ubicación geográfica como pasa con otros tipos de energías alternativas. Para este uso se han empleado las pilas tipo SOFC, MCFC, PEMFC y PAFC en diferentes lugares como hospitales, clínicas, hoteles, entre otros; tienen su principal interés en reemplazar la red eléctrica actual en lugares donde hay poca o ninguna infraestructura para la conexión o brindar nodos de expansión. Tanto las pilas de baja como de alta temperatura han sido empleadas, las de baja temperaturas debido a que son más rápidas en su puesta en marcha y las de alta temperatura por la opción que tiene de usar el calor generado en otras aplicaciones y también pueden operar con combustibles sin reformado. De acuerdo con su objetivo de aplicación se pueden diseñar como una red paralela, red interconectada, red independiente o como un generador de respaldo lo que permite clasificar las centrales eléctricas principalmente de acuerdo con su capacidad de generación, las de gran potencia de generación (300KW a 20 MW) y pequeñas y medianas plantas de generación (poco KW a 300KW). Como lo indica Upreti et al.⁸⁹ en plantas de generación de gran potencia las pilas de tipo SOFC presentan ventajas de suministro de combinado de calefacción y electricidad frente a las PEMFC o PAFC que necesitan hidrógeno puro, baja tolerancia al monóxido de carbono y muestran eficiencias bajas (30%). Para las pequeñas y medianas centrales eléctricas se utilizan las pilas tipo PEMFC, de este tipo se han diseñado unidades para operar 10 años con capacidad de 1 KW por las empresas Ebara Ballard y Fuji.

⁸⁹ UPRETI, Girish. Et al. Fuel cells for non-automotive uses: Status and prospects. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Abril 2012. Vol. 37. No. 8. p. 6339-6348. ISSN 0360-3199. [Consultado 29, abril, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912001103.

El desarrollo en aplicaciones estacionarias tiene uno de los mayores crecimientos respecto a partir del año 2014 principalmente en Europa, Asia y Estados Unidos en lo que se puede mencionar la construcción de Gyeonggi Green Energy parque de pilas de combustible más grande del mundo en Corea del Sur con capacidad de generación de 59 MW y se espera que dentro de los próximos dos años se finalice la obra en Pyeongtaek que producirá 360MW.

3.5.5 Aplicación en el transporte. El hidrógeno al ser producido por fuentes renovables ofrece una gran variedad de beneficios como proveedor de energía limpia que ayuda tanto a la disminución de emisiones contaminantes, a la seguridad del suministro de energía y la diversificación de las fuentes de combustible automotrices es por esto que grandes proyectos se han desarrollado desde 1990 hasta la actualidad para la generación de prototipos de automóviles y buses que poseen pilas de combustible que les permite su movimiento como se muestra en el Cuadro 9. Las pilas de tipo PEMFC son las empleadas como fuente de energía por su baja temperatura de funcionamiento (cercano a los 80°C), alta potencia, densidad de corriente, peso ligero, sistema de arranque rápido, baja corrosión y ajuste de potencia de salida rápida⁹⁰. A modo de ejemplo el modelo Mirai de la marca Toyota tiene autonomía de 500km, motor de 153 HP, tiempo de repostaje de 3 minutos y no genera emisiones de CO₂

Cuadro 9. Modelos de vehículos de pilas de combustible de hidrógeno.

Marca	Modelo
Toyota	<p data-bbox="1040 1205 1101 1232">Mirai</p> 

⁹⁰ MEKHILEF,S.; SAIDUR,R. y SAFARI,A. Op. cit ., p. 987

Cuadro 9. (Continuación)

<p>Audi</p>	<p>A7 H-Tron</p>  A white Audi A7 H-Tron sedan is shown from a side profile, parked in front of a modern city skyline at dusk. The car has "A7 h-tron" written on its side door.
<p>Chrysler</p>	<p>EcoVoyager</p>  A blue Chrysler EcoVoyager concept car is shown from a front three-quarter view. It has a sleek, aerodynamic design with a prominent grille and alloy wheels.
<p>Honda</p>	<p>FCX Clarity</p>  A dark red Honda FCX Clarity fuel cell vehicle is shown from a front three-quarter view, displayed in an indoor exhibition space. The car has a modern, aerodynamic design.

Cuadro 9. (Continuación)



Fuente: El Autor

En cuanto a la fabricación de automóviles, el uso de pilas de combustible da la posibilidad de realizar diferentes tipos de diseños con un enfoque eficiente que permita disminuir los costos sin embargo la industria automotriz tiene que enfrentarse a desafíos técnicos adicionales como el almacenamiento del hidrógeno y problemas de seguridad, además deben contar con un equipo técnico de profesionales altamente calificados para realizar mantenimiento a este tipo de máquinas. Teniendo en cuenta este panorama para alcanzar el éxito en el mercado se debe crear confiabilidad, automóviles con costos que permitan competir y una vida útil prolongada.

También se han realizado proyecto de automóviles híbridos combinando pilas de combustible y un sistema de baterías que arrojaron como resultado una eficiencia más alta que con un vehículo de pilas de combustible puro. La modificación respecto a un vehículo de pilas de combustible son los dispositivos de almacenamiento o un ultracondensador⁹¹ que se utiliza para soportar las pilas de combustible de tal forma que se cargan y descargan basándose en la demanda y suministro de energía, sin embargo, como lo menciona Wilberforce⁹² las pilas de hidrógeno tienen como un punto a favor que tienen la capacidad de recargarse prácticamente de forma instantánea entre otras ventajas como tiempos de operación mayores, funcionan en un rango más amplio en cuanto a las

⁹¹ Bitsche O, Gutmann G. Systems for hybrid cars. J Power Sources 2004;127(1–2):8–15.

⁹² WILBERFORCE, Tabbi, *et al.* (2016). Advances in Stationary and Portable Fuel Cell Applications. En: International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Octubre 2016. Vol. 41. No. 37. p. 16509-16522. ISSN 0360-3199. [Consultado 29, abril, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915315822. p. 16510

condiciones ambientales y pueden ser recargadas utilizando diferentes combustibles como el hidrógeno, metanol entre otros combustibles de origen fósil.

Pero no solo ha tenido aplicación en el transporte terrestre, en el transporte marítimo las pilas de combustible PEMFC, SOFC y CMFC han mostrado sus beneficios e inconvenientes como resistencia a los golpes, vida útil y estabilidad. Algunos de los proyectos desarrollados son las embarcaciones Nemo H2, METHAPU, SCHIBZ, FCSHIP, entre otros, lo que demostró que las pilas de combustible de baja temperatura que funcionan con hidrógeno licuado son una solución compacta para barcos con intervalos de abastecimiento mayores de 10 horas pero puede demandar espacios para el sistema completo hasta 5 veces más grandes que si se utilizara pilas de combustible de alta temperatura⁹³. En la aviación y la industria aeroespacial se ha visto la participación del hidrógeno desde 1960 durante el programa Gemini de la NASA en el que enviaron siete misiones utilizando pilas de combustible de intercambio de protones.

⁹³ VAN BIERT, L., *et al.* (2016). A Review of Fuel Cell Systems for Maritime Applications. *Journal of Power Sources*. p. 359.

4 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL USO DE HIDRGENO EN PILAS DE COMBUSTIBLE

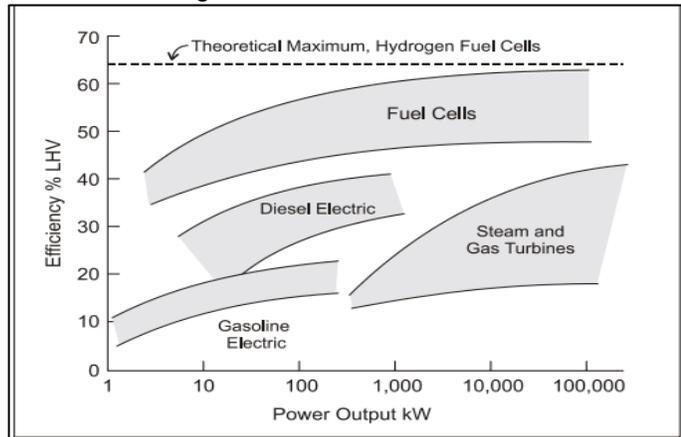
La investigación y el desarrollo a nivel global en búsqueda de soluciones en el campo energético que permitan la obtención de forma limpia ha llevado a la generación de varios tipos de prototipos de pilas de combustible que como se mostró anteriormente que tienen la capacidad y alto potencial de producir energía eléctrica en un amplio rango y permite ser usado en diferentes aplicaciones tanto móviles como estacionarias sin embargo aún hace falta un gran trabajo que les permita ser lo suficientemente competitivas en el mercado. A continuación se mostraran algunas ventajas y limitaciones que poseen las pilas de combustible hasta la fecha.

4.1 VENTAJAS

Eficiencia. Como se mencionó en el numeral 3.2 FFUNCIÓNAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE, la eficiencia alcanzada por las pilas de combustible puede ser mayor a la de un motor de combustión interna pues en este tipo de motores la eficiencia es dependiente de las temperaturas de significativamente diferentes pues representan la del motor y la temperatura de ignición de acuerdo de combustible no usan la combustión, por lo cual como se puede ver en la

4.1.1 pueden alcanzar eficiencias mucho más altas (cercana al 70%) que los sistemas de generación de energía al no dependen de las temperaturas de operación y que de acuerdo a su funcionamiento pasan directamente de energía química a energía eléctrica a diferencia de los motores convencionales que convierten la energía química en térmica y finalmente en mecánica.

Gráfica 2 Comparación entre las eficiencias de los sistemas de generación de energía.



Fuente: OFICINA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍA RENOVABLE –EERE-Fuel Cell Technology. [SITIO WEB]. Diciembre 2001. [Consultado 27, abril, 2018] Archivo pdf. Disponible en : [https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm04r0.pdf]

4.1.2 Emisiones. La generación de energía eléctrica por medio de pilas de combustible tiene como únicos subproductos electricidad, agua y calor, es por esta razón que despiertan gran interés para ser utilizadas como un vector energético. En la . Si comparamos la generación de hidrógeno a partir de gas natural con el hidrógeno producido a partir de cualquier otra fuente renovable vemos como se acerca la cantidad de CO₂ a la producción de gases que podría tener un carro con motor de gasolina, entonces en este caso de nada serviría tener un gran avance tecnológico respecto a las pilas de combustible si el hidrógeno viene de una fuente que parte de recursos no renovables.

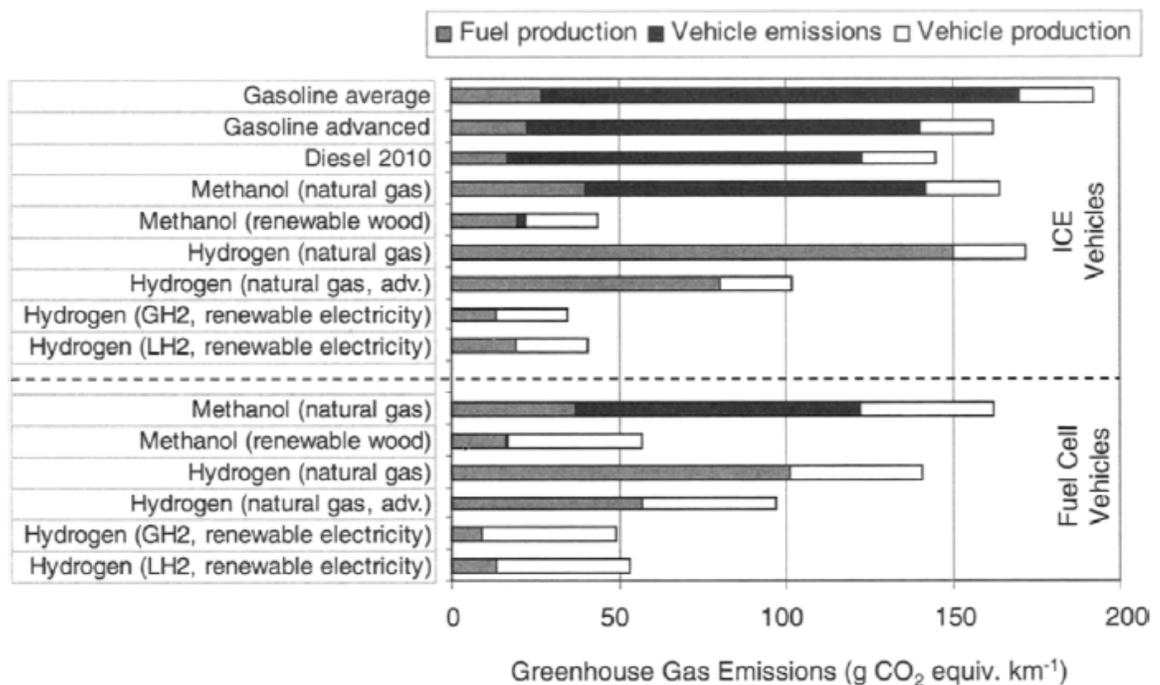
El ruido es otra de sus ventajas debido a que las pilas de combustible no poseen partes móviles, los niveles alcanzan a ser de 45db a 10 metros lo cual las hace convenientes para ser usadas en ciudades altamente pobladas.

4.1.3 Gráfica 3 se compara entre los diferentes tipos de combustible y la producción de dióxido de carbono por kilogramo durante todo el proceso que involucra desde la producción del vehículo, la producción del combustible y la generación de energía. Como se muestra en la gráfica la producción de gases efecto invernadero es dependiente de la ruta de producción de los combustibles es por esto que se obtienen mejores resultados al emplear hidrógeno producido a partir de energías renovables siendo fundamentales para aprovechar al máximo este tipo de tecnologías. Si comparamos la generación de hidrógeno a partir de

gas natural con el hidrógeno producido a partir de cualquier otra fuente renovable vemos como se acerca la cantidad de CO₂ a la producción de gases que podría tener un carro con motor de gasolina, entonces en este caso de nada serviría tener un gran avance tecnológico respecto a las pilas de combustible si el hidrógeno viene de una fuente que parte de recursos no renovables.

El ruido es otra de sus ventajas debido a que las pilas de combustible no poseen partes móviles, los niveles alcanzan a ser de 45db a 10 metros lo cual las hace convenientes para ser usadas en ciudades altamente pobladas.

Gráfica 3. Comparación de emisiones producidas con diferentes combustibles



Fuente. BARBIR, Frano. PEM FUEL CELLS. [ScienceDirect]. 2 Ed. Burlington: Academic Press, 2005. p 346 . ISBN 978-0-12-387710-9 [Consultado 29, abril, 2018]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/bdatos.usantotomas.edu.co/science/book/9780123877109>

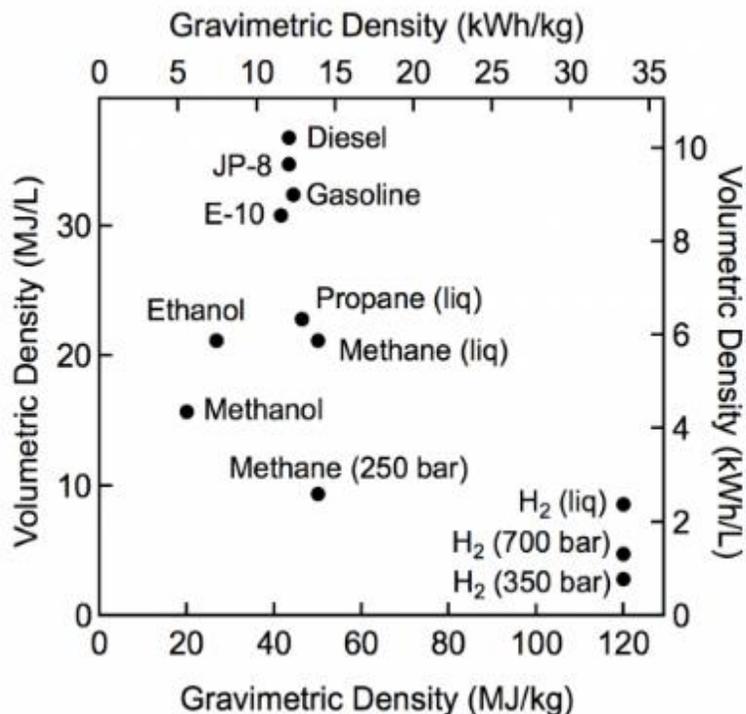
4.1.4 Modulares. Las pilas de combustible tienen eficiencias constantes e independientemente del tamaño y del factor de carga. La unión de varias células en los *stacks* permite tener un amplio rango de potencia de salida dependiendo de las necesidades, es decir que a medida que se aumenten el número de unidades. Esto brinda una gran aplicación siendo relevante en los lugares en donde no existe la infraestructura que permita la conexión a la energía eléctrica como en algunas zonas rurales.

4.2 LIMITACIONES

4.2.1 Infraestructura. Uno de los problemas más grandes que afecta la puesta en marcha de las pilas de hidrógeno en la industria automotriz es la falta de infraestructura necesaria tanto para su abastecimiento como para la distribución del hidrógeno pues al ser un elemento tan liviano y con una densidad tan baja se hace muy complicado su transporte sin embargo países como Estados Unidos, Alemania y Japón cuentan con algunas estaciones y tienen proyectada la construcción de otras más.

4.2.2 Almacenamiento. Otro de los problemas que enfrenta es el almacenamiento del hidrógeno al interior de los vehículos debido a su baja energía por unidad de volumen, a razón de esto se busca la forma de aumentar su densidad energética por unidad de volumen mediante su almacenamiento como gas comprimido, líquido criogénico o hidruros metálicos. En la siguiente gráfica se muestran los valores de energía por unidad de masa y por unidad de volumen para los diferentes combustibles, vale la pena resaltar que a pesar que el hidrógeno posee casi tres veces la energía específica comparada con la gasolina (120 MJ/kg vs 44 MJ/kg) cuando se compara en terminos de volumen vemos que en un litro puede haber 8MJ si se trata del hidrógeno mientras que en este mismo volumen se pueden depositar 32 MJ cuando el combustible es gasolina lo cual es un desafío para lograr desarrollar vehículos con capacidades de proporcionar recorridos de 300 millas antes de recargar o de almacenamiento entre 5 a 13 kg de hidrógeno.

Gráfica 4 Comparación entre densidad volumétrica y densidad gravimétrica de diferentes combustibles



Fuente: ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. Hydrogen storage. [SITIO WEB] [Consultado en 28, abril, 2018] Disponible en <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

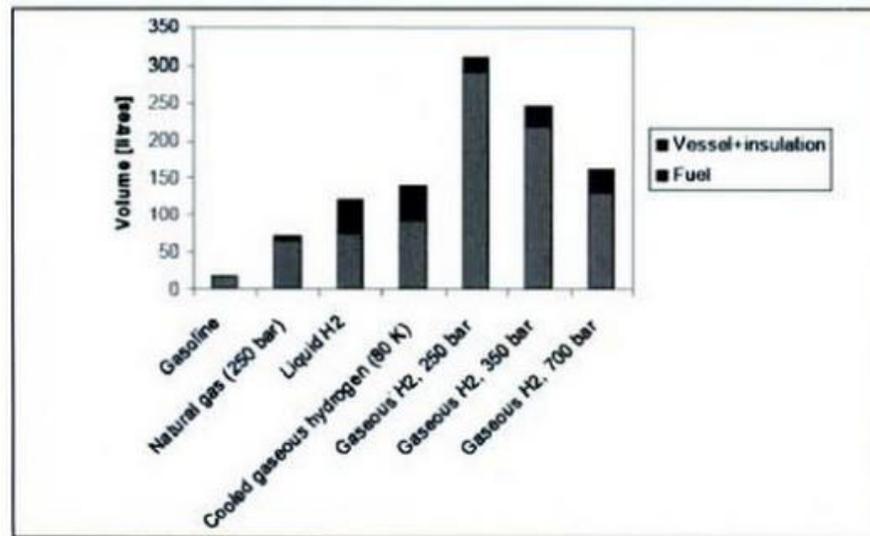
En el siguiente gráfico se muestra el volumen necesario para diferentes tipos de combustible cuando se quiere almacenar la misma cantidad de energía que producen 5 Kg de Hidrógeno. Si se intenta transportar como gas comprimido en un tanque requiere altas presiones (350-700 bar o 5000 a 10000 psi⁹⁴). y ocupa un espacio muy grande que comparado con el de un vehículo convencional de gasolina, resulta ser 10 veces más grande asumiendo que ambos tienen la misma eficiencia. La siguiente opción sería realizar un proceso criogénico para llevarlo a estado líquido (temperatura de -258°C) pero a pesar de que tiene la ventaja de ocupar el tanque menos espacio, la cantidad de energía requerida para este proceso es demasiado alta y mucho más costosa que comprimirlo.

Se puede almacenar en materiales en estado sólidos en hidruros metálicos compuestos y nanoestructuras de carbono. Los hidruros metálicos absorben el hidrógeno de forma reversible a condiciones moderadas, entre estos están los hidruros metálicos de base zirconio con titanio, vanadio y níquel, activos de

⁹⁴ ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. Hydrogen storage. [SITIO WEB] [Consultado 29, abril, 2018] Disponible en <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

magnesio, entre otros. Tienen dos problemas, el primero es que se rompen en finas partículas después de varias absorciones y liberaciones de hidrógeno y es muy sensible ante las impurezas como el monóxido y dióxido de carbono. En cuanto al almacenamiento en nanoestructuras de carbono, la molécula de hidrógeno queda enlazada por medio de enlaces débiles de la estructura del medio sólido. Para este se están investigando nanofibras de grafito, nanotubos de carbono de pared simples y compuestas. Presenta gran interés por la estabilidad y seguridad mejor respecto al almacenamiento líquido y gaseoso.

Gráfica 5. Comparación entre volúmenes de tanques de combustible



Fuente. GONZÁLEZ Antonio. Fuentes de energía para el futuro. [Google Académico]. 1 Ed. España: Secretaria General Técnica. 2008. p.100. ISBN 978-84-369-4675-8. [Consultado 29, abril, 2018]

En busca de superar estos desafíos se están realizando investigaciones dirigidas hacia vías diferentes en el corto y largo plazo:

- Almacenamiento de gas comprimido en tanques de presión avanzados de materiales compuestos de fibra que logren alcanzar hasta 700 bar
- Almacenamiento de hidrógeno criocompresionado en recipientes de presión aislados
- Uso de materiales sorbentes e hidruros metálicos para almacenar hidrógeno

4.2.3 Costos. Los costos de producción de las pilas de combustible son altos debido a tres razones, el uso de catalizadores de platino, la delicada técnica de fabricación de las membranas y los materiales utilizados para la fabricación de las placas bipolares por esta razón se están realizando investigaciones para

reemplazar el platino por otros metales o aleaciones que permitan trabajar a temperatura ambiente. La cantidad de platino que necesita una pila de combustible es de 0,4 mg de platino por cada cm² de área activa del electrodo, con base en estos datos se puede estimar el costo de \$20/KW lo que representa una parte importante del costo total. El material de fabricación de las membranas para las pilas de tipo PEMFC el cual es el naflon o fluoropolímeros también tiene un gran aporte al costo total de la pila pues cuesta \$500/m²

Se espera que si las pilas de combustible se empiezan a fabricar en grandes volúmenes baje su costo de producción dándole una oportunidad de ser competitivo en el mercado para lo cual según Wilbe force et al⁹⁵. deben alcanzar un costo de \$36/KW por lo que se requiere seguir trabajando en reducir o modificar el material del catalizador y en membranas menos costosas.

4.2.4 Vida útil. El objetivo que se tiene es poder construir pilas de combustible con tiempo de vida útil de 40000 horas y 5000 horas para uso estacionario y de transporte respectivamente⁹⁶. En la actualidad se han logrado tiempos mucho más cortos, en el orden de 3000 a 5000 horas, por esta razón muchas investigaciones se centran en comprender los mecanismos de degradación y crear materiales que ayuden a disminuir, se revisan variables como impurezas en el combustible, arranque, parada, humedad y carga que pueden afectar la estabilidad química de los materiales y componentes de las pilas.

⁹⁵ WILBEFORCE et. al. Op. cit., p. 30

⁹⁶ OFICINA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍA RENOVABLE –EERE-Fuel Cell Technology. [SITIO WEB]. Diciembre 2001. [Consultado 27, abril, 2018] Disponible en : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>

5 CONCLUSIONES

- Se definieron los procesos de producción de hidrógeno como fuente combustible los cuales se clasifican en convencionales entre los que se puede mencionar el reformado con vapor, gasificación, electrólisis y pirólisis; y no convencionales los cuales son biofotólisis, fotofermentación y fermentación oscura. Dentro de estos llama la atención el proceso de fermentación oscura debido a que es el más eficiente (60-80%) y dependiendo de los microorganismos utilizados en el medio de cultivo se pueden emplear una amplia variedad de sustratos entre los que se encuentran aguas residuales, glicerol crudo, lodos y otras corrientes de desecho.
- Se determinó que las pilas de combustible son la tecnología para emplear el hidrógeno como fuente combustible en diferentes aplicaciones como lo son portátiles, estacionarias y en el transporte que dependiendo de la temperatura se pueden clasificar en baja y alta temperatura, las cuales se clasifican en cinco tipos. Las pilas de combustible de baja temperatura de membrana polimérica (PEMFC) han despertado bastante interés por su gran avance respecto a las demás en especial en la industria automotriz.
- Se identificaron las ventajas que tienen las pilas de combustible las son sus altas eficiencias (70%) , carácter modular y no generan gases de efecto invernadero, solo producen agua y calor que puede ser aprovechado en cogeneración. Sin embargo se enfrentan a varias limitaciones como los altos costos por los materiales necesarios para su construcción como lo es el platino, la durabilidad y las grandes cantidades de energía para su almacenamiento.
- Se determinó que el panorama actual del uso del hidrógeno como fuente alternativa de energía renovable es bajo a nivel mundial, porque todavía no se ha alcanzado una eficiencia energética alta que compita con las fuentes convencionales debido a los altos costos, requieren todavía considerable experiencia industrial para aumentar su duración y rendimiento y reducir sus costes de inversión y operación.
- Si bien es cierto que se habla del hidrógeno como combustible del futuro es necesario trabajar en cada una de las áreas del proceso de producción y consumo del hidrógeno como combustible pues de esto depende el éxito de su uso en materia medioambiental en donde brinda la gran ventaja de utilizar una gran variedad de materias primas entre estas residuos de otros procesos industriales.
- La economía del hidrógeno amplía el campo de la investigación en el desarrollo de nuevos materiales que permitan almacenarlo económicamente, avances en electroquímica de catalizadores, pilas de combustible e infraestructura para su transporte.

6 RECOMENDACIONES

- Evaluar la viabilidad que tiene Colombia en la producción y uso del hidrógeno como fuente alternativa de combustible.
- Estudiar la producción de hidrógeno utilizando cultivos puros y mixtos con diferentes medios de cultivo en procesos no convencionales como la fermentación oscura en línea con una pila de combustible para la generación de electricidad.
- Investigar sobre el desarrollo de nuevos materiales para utilizar como catalizadores y las concentraciones de contaminantes que pueden afectarlos.
- Realizar una investigación dirigida a los sistemas de almacenamiento de hidrógeno como gas comprimido, criocompresionado, materiales sorbentes e hidruros metálicos.
- Realizar un estudio sobre los aspectos de seguridad que se deben tener en cuenta en la puesta en marcha del hidrógeno como combustible.

BIBLIOGRAFIA

ABO-HASHESH, M., DESAUNAY, N., & HALLENBECK, P. High yield single stage conversion of glucose to hydrogen by photofermentation with continuous cultures of *Rhodobacter capsulatus* JP91. En: *Bioresource Technology*. [ScienceDirect]. Enero 2013. Vol 128. p. 513-517. ISSN 0960-8524. [Consultado 11, febrero, 2018]. [Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412015933]

ACAR, C. & DINCER, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. En *International journal of hydrogen energy*. [ScienceDirect]. Enero 2014. Vol. 39. No. 1, p. 1-1. ISSN 0360-3199 [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913025330

ALVAREZ, Jhon, et al. Hydrogen production from biomass and plastic mixtures by pyrolysis-gasification. En: *International journal of hydrogen energy*. [ScienceDirect]. Julio 2014. Vol 39. No. 21 p. 10883-10891. ISSN 0360-3199. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000598

ARIFIN, Yalun. Et al. A Second Generation Biofuel from Cellulosic Agricultural By-product Fermentation Using *Clostridium* Species for Electricity Generation. En: *Energy Procedia* [ScienceDirect]. Septiembre 2014. Vol 47. p. 310-315. ISSN 1876-6102. [Consultado 15, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021400246X

ARGUER, Miguel Y MIRANDA, Luis. *El Hidrogeno: Fundamento de un futuro equilibrado*. [Google Académico]. 2 Ed. Madrid: Ediciones Diaz de Santos. 2012. p.107. ISBN 978-84-9969-078-0. [Consultado 3, marzo, 2018].

AZWAR, M. Y.; HUSSAIN, M. A. y ABDUL-WAHAB, A. K. Development of biohydrogen production by photobiological, fermentation and electrochemical processes: A review. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [ScienceDirect]. Marzo 2014. Vol 31. p. 158-173. ISSN 1364-0321. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007715

BALL, Michael y WIETSCHEL, Martin. The Future of Hydrogen – Opportunities and Challenges. En *International Journal of Hydrogen Energy*. [ScienceDirect]. Enero

2009. Vol. 34. No 2. p. 615-627. ISSN 0360-3199. [Consultado 25, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908015061

BARBIR, Frano. PEM FUEL CELLS. [ScienceDirect]. 2 Ed. Burlington: Academic Press, 2005. p 346 . ISBN 978-0-12-387710-9 [Consultado 29, abril, 2018]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/bdatos.usantotomas.edu.co/science/book/9780123877109>

BEDOYA, Andrea; CASTRILLÓN, Juan Camilo; RAMÍREZ, Juan Esteban; VÁSQUEZ, Juan Esteban y ARIAS, Mario. Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. En: Revista Universidad Nacional de Colombia. [Google Académico]. 2007. Vol. 75. No. 154. p. 137-157. ISSN 2346-2183. [Consultado 6, febrero, 2018]. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1723>

BRIDGWATER A.V. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. En: Journal of analytical and applied pyrolysis. [ScienceDirect]. Julio 1999. Vol 51. p. 3-22. ISSN 0165-2370. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237099000054

BROWN, L. High efficiency generation of Hydrogen fuels using termochemical cycles and nuclear power. [SITIO WEB]. Nueva Orleans. Marzo 2002. [Consultado 28, enero, 2018]. Archivo pdf. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Lloyd_Brown/publication/266499493_GA-A24326_HIGH_EFFICIENCY_GENERATION_OF_HYDROGEN_FUELS_USING_THERMOCHEMICAL_CYCLES_AND_NUCLEAR_POWER/links/543d5e180cf25d6b1ad8ba01.pdf

CANO, Ulises. Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. [SITIO WEB]. p.211. [Consultado 27, marzo, 2018] Archivo pdf. Disponible en: [<https://www.ineel.mx/reno99/apli.pdf>]

CARVAJAL, Hernan Y BABATIVA, Jhon. Estudio sobre producción de H₂ con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. En: Ingeniería y Competitividad [Google Académico]. Diciembre 2009. Vol 12. No 1. p. 31-42. ISSN 0123-3033 [Consultado 4, febrero, 2018] Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323517003>

CASA EDITORIAL EL TIEMPO. Cesia trabaja en un parque solar para Yumbo-Colombia. [SITIO WEB]. Cali. Colombia. 28 de agosto de 2016. [Consultado 22, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/colombia/cali/empresas-y-valle/16685603>

CASA EDITORIAL EL TIEMPO. ¿Llegó La Hora De La Energía Solar? [SITIO WEB]. Colombia. Sectores. 30 de julio de 2016. [Consultado 22, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/en-2015-subio-un-25-la-oferta-de-energia-solar-en-el-mundo/16660148>

CHANG,Wei-Ru; HWANG,Jenn-Jiang y WU,Wei. Environmental impact and sustainability study on biofuels for transportation applications. En: renewable and sustainable energy reviews. [ScienceDirect]. Enero 2017. Vol. 67.. p. 277-288. ISSN 1364-0321[Consultado 23, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305123.

CHANDA, Debabrata et al. Synthesis and characterization of NiFe₂O₄ electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction in alkaline water electrolysis using different polymer binders, En: Journal of power sources. [ScienceDirect]. Julio 2015. Vol 285. p. 217-226. ISSN 0378-7753 [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315004838

CHEN,Shing-Der, et al. Sequencing batch reactor enhances bacterial hydrolysis of starch promoting continuous bio-hydrogen production from starch feedstock. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Octubre 2009. Vol 34. No.20 p. 8549-8557. ISSN 0360-3199. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909013159

CHEN,Xi, al at. Stoichiometric analysis of biological hydrogen production by fermentative bacteria. En: International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Marzo 2006. Vol 31. No. 4, p. 539-549. ISSN 0360-3199. [Consultado 25, enero, 2018] Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905001187

COLOMBIA ENERGÍA. Generación hidráulica, fuente de energía y dínamo para las Exportaciones. . [SITIO WEB]. Colombia. 7 de agosto de 2013 [Consultado 25, enero, 2018]. Disponible en: <http://colombiaenergia.com/featured-article/generaci%C3%B3n-hidr%C3%A1ulica-fuente-de-energ%C3%ADa-y-d%C3%ADnamo-para-las-exportaciones>

DAS,Debabrata y VEZIROGLU,T. Nejat. Advances in Biological Hydrogen Production Processes. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2008. Vol 33. No 21. p. 6046-6057. ISSN 0360-3199 [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990800918x.

DEMIRBAS A. Thermochemical conversión of mosses and algae to gaseous products. En: Energy Sour Part A. [Google Académico]. Febrero 2009. Vol 31. No.9. p. 746–753. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567030701752594>.

DIN, Zia y ZAINAL, Z. Biomass Integrated gasification–SOFC Systems: Technology Overview. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Enero 2016. Vol 53. p. 1356-1376 ISSN 1364-0321 [Consultado 2, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115009831

ERSÖZ, Atilla. Investigation of hydrocarbon reforming processes for micro-cogeneration systems. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2008. Vol. 33. No 23. p. 7084-7094. ISSN 0360-3199 [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908008239.

FERNANDEZ, Clara. Energética del hidrógeno: contexto, estado actual y perspectivas de futuro. [Repositorio Digital]. Trabajo de grado Ingeniera Industrial. Universidad de Sevilla. Facultade de Ingeniería. Sevilla 2005 p. 35. [Consultado 2, marzo, 2018]. Disponible en bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/fichero/3.1+Producci%C3%B3n+de+Hidr%C3%B3geno.pdf

GONZÁLEZ Antonio. Fuentes de energía para el futuro. [Google Académico]. 1 Ed. España: Secretaria General Técnica. 2008. p.100. ISBN 978-84-369-4675-8. [Consultado 29, abril, 2018]

GUAN Qing, al at. The rapid bi-level exploration on the evolution of regional solar energy development. En: Physica A: Statistical mechanics and its applications. [ScienceDirect]. Enero 2017. Vol 465.p. 49-61. ISSN 0378-4371 [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437116305234

GUTIÉRREZ JODRA, Luis. El hidrógeno, combustible del futuro. En: Revista de la Real Academia de ciencias exactas, físicas y naturales.[Google Academico]. Madrid. 2005. Vol. 99, No. 1, p. 49-67 [Consultado 19, diciembre, 2017]. Disponible en <http://www.rac.es/ficheros/doc/00447.pdf>

HALLENBECK, Patrick Y BENEMANN, John. Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes. En: International Journal of Hydrogen Energy, [ScienceDirect]. Diciembre 2002. Vol 27. No 12. p. 1185-1193. ISSN 0360-3199. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319902001313

HALLENBECK,Patrick C. y GHOSH,Dipankar. Advances in Fermentative Biohydrogen Production: The Way Forward? . En: Trends in Biotechnology. [ScienceDirect]. Mayo 2009. Vol 27. No.5 p. 287-297. ISSN 0167-7769. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779909000572

HAMAD, Mohamed A. Hydrogen rich gas production from catalytic gasification of biomass. Renewable Energy. [ScienceDirect]. Enero 2016. Vol 85. p. 1290-1300. ISSN 0960-1481[Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115301786

HOLLADAY,J. et al. An overview of hydrogen production technologies. En: Catalysis today. [ScienceDirect]. Enero 2009. Vol. 139. No, 4 p. 244-260. ISSN 1364-0321. [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586108004100

HOON, Sung et al. High-activity electrodeposited NiW catalysts for hydrogen evolution in alkaline water electrolysis. En: Applied surface science. [ScienceDirect]. Septiembre 2015. Vol 349. p. 629-635. ISSN 0169-4332. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433215011587>

KALAMARAS, Christos y EFSTATHIOU Angelos. Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. En: Conference paper of energy. [Google Academico]. Limasol. Noviembre 2012. Vol 2013. p. 9. ISSN 690627. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.hindawi.com/journals/cpis/2013/690627/

KAPDAN, Ilgi y KARGI, Fikret. Bio-hydrogen production from waste materials. En: Enzyme and Microbial Technology. [ScienceDirect]. Marzo 2006. Vol 38. No. 5, p. 569-582. ISSN 0141-0229 [Consultado 23, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141022905005053

KARIMIPOURFARD, D., KABIRI, S., y RAHIMPOUR, M. A novel integrated thermally double coupled configuration for methane steam reforming, methane oxidation and dehydrogenation of propane. En: Journal of natural gas science and engineering. [ScienceDirect.]. Iran. Noviembre 2014. Vol 21. p. 137. ISSN 1875-5100. [Consultado 27, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510014001814.

KOVACS, Kornel , MAROTI, Gergely; Y RAKHELY, Gabor. A novel approach for bio-hydrogen production. En: International Journal of Hydrogen Energy.

[ScienceDirect]. Septiembre 2006. Vol 31. p. 1460-1468. ISSN 0360-3199. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319906002163

KRALEVA, Elka, et al. Hydrogen production by bioethanol partial oxidation over Ni based catalysts. Applied Catalysis B: Environmental [ScienceDirect]. Diciembre 2015. Vol. 179. p. 509-520. ISSN 0926-3373. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337315003215

LENNTECH, Hydrogen (H) – Chemical properties, Health and Environmental effects. [<http://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>]. Holanda.

LIN, Chi-Neng, et al. Integration of fermentative hydrogen process and fuel cell for on-line electricity generation. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Mayo 2007. Vol. 32. No. 7. p. 802-808. ISSN 0360-3199. [Consultado 13, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319906004733.

LONDON ARRAY. London Array- The world's largest offshore wind farm. [SITIO WEB]. Londres. Reino Unido. 2009. [Consultado 25, enero, 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.londonarray.com/wp-content/uploads/London-Array-Brochure.pdf>

LOPES, Thiago; PAGANIN, VALDECIR A. y GONZALEZ, Ernesto R. The effects of hydrogen sulfide on the polymer electrolyte membrane fuel cell anode catalyst: H₂S–Pt/C interaction products. En: Journal of power sources. [ScienceDirect]. 1 agosto 2011. Vol. 196. No. 15, p. 6256-6263. ISSN 0378-7753 [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311008044

MARTINEZ, Lucas. Termotecnia básica para ingenieros químicos: procesos termodinámicos y máquinas. 1 Ed. Cuenca: Ed. De la Universidad de Castilla-La Mancha. 2007. p.65. ISBN 978-84-8427-499-5. [Consultado 25, marzo, 2018].

MARZOLF, Natacha. Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia. [SITIO WEB]. Colombia. 2014. [Consultado 23, enero, 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6558/Energia%20Geotermica%20Colombia%207-1-14finalweb.pdf?sequence=1>

MCLEAN, G. F., et al. An Assessment of Alkaline Fuel Cell Technology. En: International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Mayo 2002. Vol. 27. No

5. p. 507-526. ISSN 0360-3199 [Consultado 27, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319901001811

MELIS, Anastasios y HAPPE, Thomas. Hydrogen production. green algae as a source of energy. En: Plant physiology. [Google Académico]. Noviembre 2001. vol. 127, No. 3, p. 740-748. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en <http://www.plantphysiol.org/content/127/3/740>

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R. y SAFARI, A. Comparative Study of Different Fuel Cell Technologies. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. . [ScienceDirect]. Enero 2012. Vol. 16. No 1. p. 981-989. ISSN 1364-0321. [Consultado 27, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004709

MILEWSKI, Jarosław, et al. Development of Molten Carbonate Fuel Cells at Warsaw University of Technology. En: Energy Procedia. [ScienceDirect]. Diciembre 2017. Vol. 142. p. 1496-1501. ISSN 1876-6102. [Consultado 29, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217363543

MURCIA, Rodríguez. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de ingeniería. [Scielo]. Bogotá. 15, enero de 2009. Vol. 28. No 83 p. 83-89 ISSN 0121-4993. [Consultado 22, enero, 2018]. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n28/n28a12.pdf>

NIKOLAIDIS, Pavlos y POULLIKKAS, Andreas. A comparative overview of hydrogen production processes. En: Renewable and sustainable energy reviews. . [ScienceDirect]. Enero 2017. Vol. 67. p. 597-611. ISSN 1364-0321. [Consultado 28, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305366

OFICINA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍA RENOVABLE –EERE-Fuel Cell Engine and Related Technologies. [SITIO WEB]. Diciembre 2001. [Consultado 27, marzo, 2018] Archivo pdf. Disponible en : [\[https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm04r0.pdf\]](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm04r0.pdf)

OFICINA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍA RENOVABLE –EERE-Fuel Cell Technology. [SITIO WEB]. Diciembre 2001. [Consultado 27, abril, 2018] Archivo pdf. Disponible en :

[https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm04r0.pdf]

PARTHASARATHY, Prakash y NARAYANAN, Sheeba. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review. En: Renewable Energy. [ScienceDirect]. Junio 2014. Vol 66. p 570-579. ISSN 0960-1481. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113007027.

PATRA Tapas, NIMISTRA, K; Y SHETH, Pratik. A comprehensive dynamic model for downdraft gasifier using heat and mass transport coupled with reaction kinetics. En: Energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2016. Vol 116. No.1. p. 1230-1242. ISSN 0360-5442. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216314578

PORTAFOLIO. El viento ganaría terreno como fuente de energía en el país. [SITIO WEB]. Colombia. Economía. 2 de febrero de 2015. [Consultado 27, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/viento-ganaria-terreno-fuente-energia-pais-39746>

RAHMAN, S. et al. Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology. En: Renewable and sustainable energy reviews.[ScienceDirect]. Diciembre 2016. Vol. 66. p. 137-162. ISSN 1364-0321. [Consultado 26, enero, 2018]. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116303756>

REUNGSANG, Alissara et al. Production of biohydrogen from hydrolyzed bagasse with thermally preheated sludge. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Septiembre 2009. Vol 34. No.18. p. 7612-7617. ISSN 0360-3199. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909010957

MENG, Y., WU, T. & CHING J.(2014). A review of sustainable hydrogen production using seed sludge via dark fermentation. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Junio 2014. Vol 34. p. 471-482. ISSN 1364-0321. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001658

REVISTA SEMANA. La Inestable Apuesta Por Los Biocombustibles. [SITIO WEB]. Colombia. Industria. 20 de febrero de 2016. [Consultado 22, enero, 2018].

Disponible en: <http://www.semana.com/economia/articulo/biocombustibles-ya-no-son-tan-buen-negocio/461232>

ROSALES, Luis, GARCÍA, Raul; Y DE LEÓN RODRÍGUEZ, Antonio. Estimation of hydrogen production in genetically modified E. coli fermentations using an artificial neural network. En: International Journal of Hydrogen Energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2010. Vol 35. No 24. p. 13186-13192. ISSN 0360-3199. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910017763

SALVADOR, Arturo. Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. En: Revista de la Real Academia de ciencias exactas, físicas y naturales. [Google Academico]. Madrid. 2010. Vol. 104. No. 2. p. 331-345. [Consultado 23, enero, 2018]. Disponible en: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>

SHAYAN,E., ZARE,V; y MIRZAEI,I. Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents. En: Energy Conversion and Management. [ScienceDirect]. Marzo 2018. Vol 159. p. 30-41. ISSN 0196-8904. [Consultado 2, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417312554

STEINBERG, Meyer. A highly efficient combined cycle fossil and biomass fuel power generation and hydrogen production plant with zero CO₂ emission. En American Society of Mechanical Engineers. [Google Academico]. Nueva York. Junio 2004. ISBN 0-7918-4165-0. [Consultado 27, enero, 2018]. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Lloyd_Brown/publication/237441113_High_Efficiency_Generation_of_Hydrogen_Fuels_Using_Nuclear_Power/links/0c9605269964f461b0000000/High-Efficiency-Generation-of-Hydrogen-Fuels-Using-Nuclear-Power.pdf

SØRENSEN, Bent. Hydrogen and Fuel Cells Emerging Technologies and Applications, [ScienceDirect]. 2 Ed. Nueva York: Academic Press. 2005, p. 450. ISBN 9780123965035. [Consultado 27, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/book/9780123877093

SEAL, Diptendu et al. Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review. En: Renewable and sustainable energy reviews. [ScienceDirect]. Septiembre 2008. Vol 12. No. 7 p. 1909-1927. ISSN 1364-0321. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000482.

SEIBERT,M.; FLYNN,T. Y. y GHIRARDI,M. L. Strategies for Improving Oxygen Tolerance of Algal Hydrogen Production. [ScienceDirect].Oxford: Pergamon. 2001. p. 67-77 ISBN 9780080439471. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780080439471>

TASRI, Adek Y SUSILAWATI, Anita. Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia. En: Sustainable energy technologies and assessments. [ScienceDirect]. Septiembre 2014. Vol 7. p. 34-44. ISSN 2213-1388. [Consultado 15, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138814000265

UMBERTO, Lucia. Overview on Fuel Cells. En Renewable and Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Febrero 2014. Vol. 30. p. 164-169. ISSN 1364-0321. [Consultado 25, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006965

UPRETI, Girish. Et al. Fuel cells for non-automotive uses: Status and prospects. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Abril 2012. Vol. 37. No. 8. p. 6339-6348. ISSN 0360-3199. [Consultado 29, abril, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912001103.

WANG, Wenju y WANG, Yaquan. Thermodynamic analysis of hydrogen production via partial oxidation of ethanol. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Octubre 2008. Vol. 33. p. 5035-5044. ISSN 0360-3199. [Consultado 29, enero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990800952X

WANG, Xueqing. et al.Enhanced photo-fermentative hydrogen production by Rhodospirillum rubrum with pigment content manipulation. En: Bioresource technology. [ScienceDirect]. Agosto 2012. Vol 118. p. 490-495. ISSN 0960-8524. [Consultado 11, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412008516

WATANABE, T. Fuel cell power system applications in Japan. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, [Google Académico]. Mayo 1997. Vol. 211. No 2. p. 113-119. [Consultado 27, marzo, 2018]. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.819.5189&rep=rep1&type=pdf>

WILBERFORCE, Tabbi et al. Advances in stationary and portable fuel cell applications. En: Internacional journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Marzo 2016. Vol. 41. No. 37. p. 16509-16522. ISSN 0360-3199. [Consultado 29, abril, 2018]. Disponible en

www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915315822

WINKLER, Martin, et al. [Fe]-Hydrogenases in Green Algae: Photo-Fermentation and Hydrogen Evolution Under Sulfur Deprivation. En: International journal of hydrogen energy. [ScienceDirect]. Diciembre 2002. Vol 27. No 12. p. 1431-1439. ISSN 0360-3199. [Consultado 9, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319902000952

WU, C et al. Hydrogen production via catalytic steam reforming of fast pyrolysis bio-oil in a two-stage fixed bed reactor system. En: Fuel processing technology. [ScienceDirect]. Diciembre 2008. Vol 89. No. 12 p. 1306-1316. ISSN 0378-3820. [Consultado 5, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382008001525

WU, Jinfeng, et al. A Review of PEM Fuel Cell Durability: Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies. En: Journal of Power Sources. [ScienceDirect]. Septiembre 2008. Vol. 184. No 1. p. 104-119. ISSN 0378-7753. [Consultado 27, marzo, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775308011968

ZENG Kai Y ZHANG Dongke. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. En: Progress in Energy and Combustion Science. [ScienceDirect]. Junio 2010. Vol 36. No. 3 p. 307-326. ISSN 0360-1285. [Consultado 2, febrero, 2018]. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000598