

ESTADO DEL ARTE DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE**STATE OF THE ART OF FUEL CELLS**

Erick Daniel Rincón Castrillo*, **PhD. Juan José García Pabón****, **MSc. José Ricardo Bermúdez Santaella*****

* Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Electromecánica, Grupo de Investigación de Desarrollo en Procesos Industriales (GIDPI).

Avenida Gran Colombia No. 12E-96 Barrio Colsag, San José de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia.

a+573123289641, b+573214321321.

E-mail: {aerickdanielrc, bjosericardobs}@ufps.edu.co.

2Universidad Federal de Itajubá, Instituto de Ingeniería.

Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, Brasil.

+553175597148.

E-mail: jjgp.ufmg@gmail.com.

Resumen: Las celdas de combustible han sido implementadas desde hace varias décadas, la NASA desde 1960 las ha usado en sus programas espaciales, sin embargo, no se le ha dado la importancia que esta tecnología debería tener al ser una opción ambientalista y eficiente en su conversión y aporte energético. Este trabajo presenta una conceptualización y revisión de la literatura de las pilas, células o celdas de combustible con el objetivo de comprender fácilmente su comportamiento para contribuir con su divulgación en Colombia. Los temas enunciados en este documento son la clasificación de estos dispositivos, permitiendo identificar las características y el principio de funcionamiento; también se realiza una revisión de diferentes proyectos y artículos que evidencian los avances y aplicaciones desde el área académica hasta la industria, los documentos examinados fueron 57, estas investigaciones realizadas cubren un periodo de tiempo desde el año 2004 hasta 2018.

Palabras clave: Revisión bibliográfica, energía, celdas de combustible, electrolito, ion.

Abstract: Fuel cells have been implemented for several decades, NASA has used them since 1960 in their space programs, however, it has not been given the importance that this technology should have as an environmental and efficient option in its energy conversion and supply. This paper presents a conceptualization and review of the literature of batteries, cells or fuel cells in order to easily understand their behaviour to contribute to its dissemination in Colombia. The topics stated in this document are the classification of these devices, allowing to identify the characteristics and the operating principle; a review of different projects and articles that show progress and applications from the academic area to the industry is also carried out, the documents examined were 57, these investigations cover a period of time from 2004 to 2018.

Keywords: Bibliographic review, energy, fuel cells, electrolyte, ion

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los hidrocarburos se encuentran en el petróleo crudo, este último durante mucho tiempo ha sido utilizado como fuente de energía y materia prima para obtener una gran variedad de derivados apetecidos a escala global, por esto se ha generado una dependencia de los diferentes tipos de combustibles fósiles. El problema presentado por estos tipos de fuentes de energía es que son limitados, es decir, no renovables y son altamente contaminantes, dejando como consecuencia daños al medio ambiente y a la salud humana.

El uso de los combustibles fósiles combinados con la tecnología es una alternativa creada por el hombre para progresar en las áreas del transporte, electricidad, fuerza motriz, comunicaciones, producción de alimentos, etc., para mejorar la calidad de vida y proveer mayor comodidad a las personas, lo anterior desde una perspectiva poco ambientalista (Aguilar, 2015) (E Flórez, CAP Cortes 2017).

Los combustibles derivados del petróleo han ocasionado que los niveles de contaminación ambiental principalmente por la emisión de gases de combustión hayan aumentado en los últimos 50 años trayendo consigo el aumento del calentamiento global, la generación de lluvia ácida y el crecimiento en el número de personas con enfermedades respiratorias (Castellanos y Molina, 2013).

En la actualidad las baterías eléctricas son el proveedor más implementado para usarse como energía de respaldo debido a que están diseñadas para almacenar energía química durante un periodo establecido y posteriormente se transforma en energía eléctrica, estos dispositivos son muy útiles pero presentan desventajas como el tamaño y peso de acuerdo con la demanda energética requerida, además el usuario no tiene conocimiento de cuanto poder de respaldo está a su disposición teniendo en cuenta que con el pasar del tiempo y el número de ciclos por descarga disminuye, otro inconveniente de los acumuladores eléctricos hechos de ácido-plomo se presenta cuando termina su vida útil porque se convierten en desechos altamente tóxicos, también se debe tener en cuenta el límite de temperatura (25 °C) al que deben ser usadas, si excede este valor pueden presentar inconsistencias o daños (Benz *et al.*, 2009).

En los últimos años se han buscado fuentes de energías alternativas limpias que reduzcan de forma gradual la sujeción de las fuentes de energías convencionales para en un futuro cambiar de forma radical la base energética actual. La producción de potencia en grandes y pequeñas cantidades, la generación de gases no tóxicos como el hidrógeno (H_2) y el oxihidrógeno (HHO) que se pueden emplear como combustibles potenciadores mucho más limpios; estos procesos se pueden realizar a través de las celdas de combustible.

La celda de combustible es un dispositivo electroquímico que funciona de forma bidireccional, transformando la energía de una reacción química en energía eléctrica, este es el caso de las celdas galvánicas o celdas voltaicas que funcionan de forma espontánea debido a que producen energía en forma de trabajo eléctrico con una reacción exotérmica en donde los reactivos están en un nivel energético mayor en comparación de los productos. Los electrolizadores o celdas electrolíticas muestran la versatilidad de las celdas de combustible porque transforman la energía eléctrica en una reacción química de oxidación – reducción que no tiene lugar de modo espontáneo pese a la necesidad de suministrar al proceso energía en forma de trabajo eléctrico para que ocurra la reacción endotérmica con los productos en un nivel energético mayor en comparación de los reactivos (Simbaña, 2016; Castellanos y Molina, 2013).

Las pilas de combustible son una opción más limpia en comparación de la gasolina y el diésel usados en los motores de combustión interna; y la energía eléctrica de las baterías. La eficiencia de las celdas es otro parámetro que se debe tener en cuenta siendo aproximadamente el doble de los motores térmicos debido a que estos últimos se ven afectados por las limitaciones establecidas por el Teorema de Carnot (Cabot *et al.*, 2013).

En este artículo se realizará una revisión bibliográfica de las celdas de combustible para conocer el estado del arte de estos dispositivos, de esta manera se busca estudiar las clases de celdas existentes para saber cuáles son las condiciones en las que cada una pueda utilizarse, así como también sus características. Por otro lado, se analizarán las diferentes aplicaciones en la industria, así se podrán evidenciar las ventajas ofrecidas por estos mecanismos, siendo reflejadas principalmente en el medio ambiente y en el aumento de la eficiencia de los procesos.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

De acuerdo con la literatura concerniente a las celdas de combustible es necesario realizar la clasificación de estos dispositivos para conocer los diferentes tipos y características, de esta manera se puede establecer el campo de aplicación específico de cada una en la industria.

Actualmente la clasificación que se hace teniendo en cuenta el tipo de electrolito que utilizan (Simbaña, 2016), no obstante, en esta sección se tendrán en cuenta también otras variables (temperatura, eficiencia y rango de potencia) que intervienen en el funcionamiento de las celdas.

2.1 Celdas de Combustible Alcalina (AFC)

Las celdas alcalinas fueron las primeras tipos de celdas de combustible implementadas en las décadas de los 60 y 70, tuvieron campo de acción en sus inicios en los programas espaciales, específicamente el Programa Apolo de la NASA, era necesario suministrar energía en forma de potencia a equipos que conformaban las naves y agua con alto grado de pureza, estas tareas las realizaban estas celdas (AFC) que ahora se emplean para proveer de potencia a bordo del transbordador espacial (“Sistema de Transporte Espacial”) (Fernández, 2009; Henne y Friedrich, 2009).

Este tipo de celdas utilizan como electrolito soda cáustica o hidróxido de potasio (KOH) (López, 2010) con una concentración aproximada de 85% (Fernández, 2009), en consecuencia, se conducen iones hidroxilo (OH^-) transportándose del cátodo al ánodo (contrario a otras clases de celdas que transportan los iones del ánodo al cátodo) (García, 2014). Entre las características más importantes de esta sustancia química se encuentran su excelente conductividad iónica.

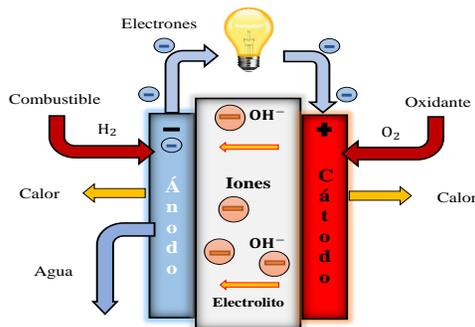


Figura 1. Celda de combustible alcalina (Fuente: Autor).

En la figura 1 se puede apreciar el principio funcionamiento de la celda alcalina, en su interior ocurre una reacción redox (oxidación – reducción) dividida en dos semirreacciones debido a que en el ánodo (electrodo positivo) se produce la oxidación del hidrógeno por medio de la reacción con los iones hidroxilos (OH^-) en el electrolito para generar agua, se liberan dos electrones que pasan por medio de un circuito externo de carga, y en el cátodo (electrodo negativo) llegan los electrones transferidos que reaccionan con el agua y oxígeno forman nuevos iones hidroxilos (López, 2010).

2.2 Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC)

Las celdas PEMFC o también llamadas PEFC usan como electrolito una membrana de intercambio iónico conformada por una película de polímero sólido (Velásquez y Quiceno, 2013) que consiste de un teflón acidificado (García, 2014), de esta manera se conducen los iones hidrógeno (H^+), la membrana es necesario que este hidratada para su correcto funcionamiento debido a que produce agua (H_2O), esta celda debe evitar que la membrana se seque teniendo una correcta utilización del agua para poder evadir la vaporización (Fernández, 2009).

El electrolito previamente mencionado en contraste con los de las otras clases de celdas de combustible presenta fase sólida, además se emplea como separador/electrolito de la celda y opera a baja temperatura. Entre las características más relevantes de las celdas PEFC se resalta su capacidad de generar electricidad de manera eficiente, y la temperatura de operación oscila entre los $30\text{ }^\circ\text{C}$ y $90\text{ }^\circ\text{C}$ (Fernández, 2009).

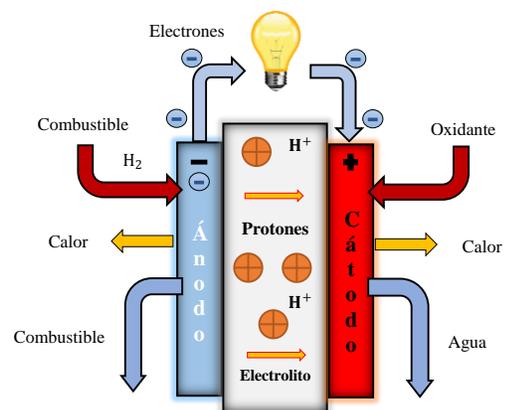


Figura 2. Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (Fuente: Autor).

Por medio de la figura 2 se puede observar cómo se genera la conversión de energía química en energía eléctrica a través de una reacción electroquímica, el electrolito está en contacto con el ánodo y el cátodo, la membrana debe transportar iones de hidrógeno hacia el cátodo el cual recibe los protones, mientras que los electrones circulan mediante un circuito externo de carga para reaccionar con el oxígeno y los protones en el cátodo, produciendo agua y calor (Fernández, 2009).

Los Laboratorios de Investigación y Desarrollo de General Electric Company fueron los principales pioneros que llevaron a cabo el desarrollo de las celdas PEMFC, tomándolas como objeto de estudio en la conversión y producción de energía (Appleby, 2009).

2.3 Celdas de Combustible de Metanol Directo (DMFC)

Las DMFC emplean metanol (líquido obtenido a baja temperatura o por medio de la reacción del monóxido de carbono y el hidrógeno) directo u otro con estructura química similar como combustible, en esencia esto es un sistema básico con un combustible que tiene una alta densidad de energía (Fernández, 2009), a su vez en el ánodo se proporciona una mezcla líquida de metanol y agua, en el mismo instante al cátodo se proporciona aire circundante.

Entre las características operativas de las DMFC se deben mencionar los niveles de rendimiento alcanzados usando aire, debido a que se encuentran en los intervalos de $180 - 250 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$, y los valores de voltaje normalmente están entre $0.25 - 0.4 \text{ (V)}$ (Fernández, 2009).

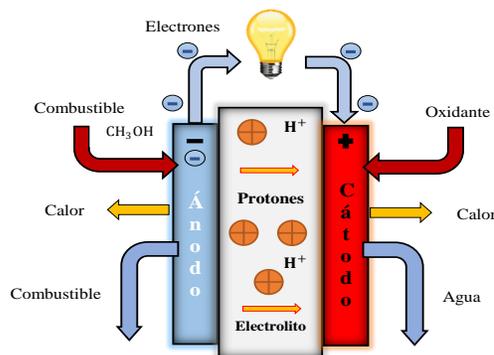


Figura 3. Celda de combustible de metanol directo (Fuente: Autor).

El principio de funcionamiento de las DMFC se puede analizar en la figura 3, por medio de una reacción electroquímica el ánodo produce dióxido de carbono, protones y electrones (son portadores de energía en forma de trabajo eléctrico), esto es provocado por la previa reacción entre el metanol y el agua. El cátodo recibe los iones positivos que son transportados por el electrolito de polímero para reaccionar con el oxígeno y producir agua (Fernández, 2009).

Pese a que las celdas de combustible de metanol directo se consideran como sistemas básicos, se podrían subdividir en dos modelos utilizados hoy en día: el modelo DMFC (explicado en esta sección de la clasificación), y el modelo RMFC (celda de combustible de metanol reformado) que maneja una densidad de potencia bastante elevada, a su vez se debe resaltar la necesidad de usar una mezcla de metanol y agua para que el proceso de reformado se pueda llevar a cabo (Cremers *et al.*, 2009).

2.4 Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)

Los dispositivos PAFC fueron los primeros prototipos de celdas de combustible que salieron al mercado (Fernández, 2009), se considera que están bien diseñadas e implementadas teniendo en cuenta que se registran un mínimo de doscientos sistemas eléctricos estacionarios de 200 KW comercializados en los inicios de la década de los noventa. Es importante resaltar la durabilidad de esta clase de cubas debido a que algunas han logrado 40.000 horas de uso (Miller, 2009).

El electrolito (ácido fosfórico) para la conducción iónica es distribuido en una capa porosa de carburo de silicio (SiC) que separa al ánodo del cátodo, existen celdas que utilizan como electrolito ácido sulfúrico para su funcionamiento (Fernández, 2009; García, 2014).

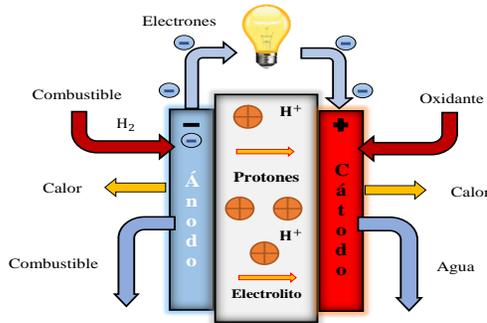


Figura 4. Celda de combustible de ácido fosfórico
(Fuente: Autor).

Las reacciones generadas en los electrodos se muestran en la figura 4, cuando se adiciona hidrógeno en el ánodo, los electrones (son transportados por un circuito externo de carga) y los iones hidrógeno (circulan desde el ánodo hasta el cátodo por medio del electrolito) son separados porque se lleva a cabo una reacción. En el cátodo se produce el agua como consecuencia de la reacción del oxígeno con los protones y electrones (García, 2014).

2.5 Celdas de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)

La industria naval ha sido impactada por el desarrollo de las MCFC implementadas en los barcos (naves a bordo), centrándose principalmente en la generación de energía a bordo y propulsión (Winkler, 2009). El electrolito usado por estas celdas es una mezcla de carbonato de litio y potasio (normalmente Li_2CO_3 y K_2CO_3), el ion de carbonato (se agota ante la necesidad de reciclar CO_2) es transportado desde el cátodo hasta el ánodo teniendo en cuenta que el ion portador de carga no es más grande que un protón (Fernández, 2009; García, 2014).

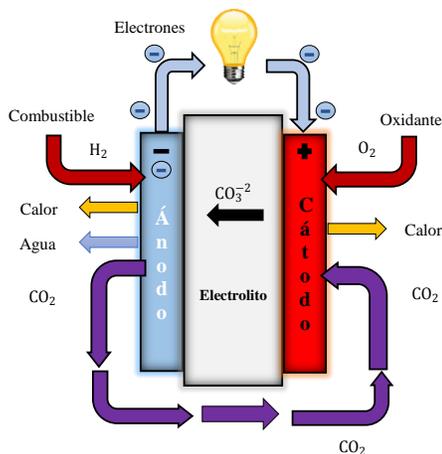


Figura 5. Celda de combustible de Carbonato Fundido (Fuente: Autor).

La figura 5 es un esquema de la MCFC donde se pueden observar las reacciones internas que ocurren en el dispositivo, en el primer caso cuando se suministran tres moléculas de hidrógeno y reaccionan con el ion carbonato producen tres moléculas de agua, tres moléculas de dióxido de carbono y seis electrones que circulan por un circuito externo de carga, para el segundo caso cuando se suministra monóxido de carbono (reemplazando al hidrógeno), al reaccionar con el ion carbonato los productos son dos moléculas de dióxido de carbono y dos electrones que circulan por un circuito externo (García, 2014).

2.6 Celdas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)

En la transformación de energía química a eléctrica se considera que las celdas de combustible de óxido sólido son los dispositivos más eficientes (Fernández, 2009), utilizan un electrolito (comúnmente circonia) en estado sólido para transportar los iones óxido del cátodo al ánodo, el material empleado para los electrodos es el metal siendo el cobalto y níquel los más usados (García, 2014; Aguilar, 2015).

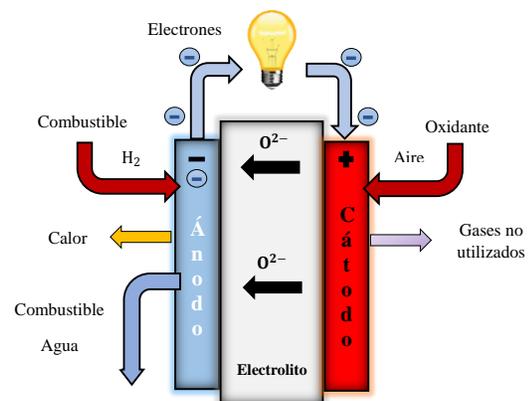


Figura 6. Celda de combustible de óxido sólido
(Fuente: Autor).

En la figura 6 se puede observar el funcionamiento electroquímico de las SOFC, en el cátodo reaccionan media molécula de oxígeno con dos electrones para producir iones óxido que recibe el cátodo para posteriormente reaccionar con hidrógeno generando agua (García, 2014).

3. ESPECIFICACIONES DE OPERACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

La tabla 1 presenta un resumen de las especificaciones de operación más importantes de las celdas previamente descritas, de esta manera se pueden identificar las reacciones que ocurren en cada electrodo (ánodo y cátodo), los iones transferidos, y la tensión de funcionamiento.

Una forma de valorar la viabilidad de las pilas de combustible es comparándolas con otros sistemas de generación de energía convencionales, este análisis se realiza por medio de la tabla 2 teniendo en cuenta la potencia de operación de cada proceso, eficiencia y costo.

Tabla 1. Especificaciones de operación de las celdas de combustible

Tipo de celda de combustible	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Reacción anódica	$2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	$H_2O + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$O^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$
Reacción catódica	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$3/2O_2 + 6e^- + 6H^+ \rightarrow 3H_2O$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Portador de carga	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Combustible	H_2 (puro)	H_2 (puro)	CH_3OH	H_2 (puro)	$H_2, CO, CH_4, otros$	$H_2, CO, CH_4, otros$
Oxidante	O_2 (aire)	O_2 (aire)	O_2 (aire)	O_2 (aire)	O_2 (aire)	O_2 (aire)
Cogeneración	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Voltaje (v)	1.0	1.1	0.2 – 0.4	1.1	0.7 – 1.0	0.8 – 1.0

(Fuente: Autor).

Tabla 2. Celda de combustible comparada con otros sistemas de generación de energía convencionales

Sistema de generación de energía	Motor alternativo: diesel	Generador de turbina	Fotovoltaica	Turbina de viento	Celda de combustible
Rango de capacidad	500 kW–50MW	500 kW–5 MW	1 kW–1 MW	10 kW–1 MW	200 kW–2 MW
Eficiencia	35%	29 – 42%	6 – 19%	25%	40 – 85%
Costo de capital (\$/kW)	200 - 350	450 - 870	6600	1000	1500 - 3000
Costo de operación y mantenimiento (\$/kW)	0.005 – 0.015	0.005 – 0.0065	0.001 – 0.004	0.01	0.0019 – 0.0153

(Fuente: Alvarado, 2013)

4. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

La versatilidad de las celdas de combustible es uno de los factores que le ha permitido tener campo de aplicación en la industria (sector del transporte) y a nivel académico (análisis de la conversión de

energía de procesos electroquímicos, estudio de la eficiencia y reducción de gases tóxicos en los procesos donde tienen lugar las cubas). En esta sección se enunciarán las aplicaciones en la industria más relevantes de las células de combustible para de esta manera identificar el

Varios son los países que han sido pioneros en la implementación de celdas de combustible en el sector del transporte como Brasil, Estados Unidos, Canadá, Alemania, Inglaterra, China y Japón, el auge inició desde el año 2003 hasta el día de hoy, esta nueva alternativa energética motivó a que en el año 2009 el G8 (grupo de países con las economías más industrializadas del planeta) declarara que para el año 2050 las emisiones al ambiente de dióxido de carbono deben haberse reducido como mínimo en un 80% tomando como punto de referencia los niveles registrados en 1990.

El impacto y los avances en lo académico de las celdas de combustible se evidencian por medio de *Tabla 3. Estudios sobre celdas de combustible en la industria del transporte (a)*

Autor	Contenido
(Salazar, 2008)	Realizó un diseño mecánico para la construcción de una motocicleta energizada con PEMFC para ser usada como vehículo que emplea un combustible mucho más limpio permitiendo la conservación del medio ambiente. El autor concluye que el modelo propuesto en su proyecto se puede utilizar como referencia en la construcción de vehículos eléctricos alimentados con celdas de combustible.
(Franco y Baena, 2010)	Estudiaron el impacto en la utilización de vehículos con fuentes de energías alternativas, para llevar a cabo este análisis modelan cuatro principales clases de vehículos: vehículos con motor de combustión interna, vehículos eléctricos, vehículos híbridos (eléctricos y combustión) y vehículos eléctricos impulsados por celdas de combustible. En este artículo se argumenta el uso de las tecnologías energéticas alternativas como una excelente vía en la descontaminación de la atmósfera.
	Determinó el modelo matemático

impacto y los avances (proyectos que se han ejecutado) de esta tecnología a nivel mundial.

4.1 Transporte

los siguientes estudios (tabla 1) que han arrojado resultados favorables permitiendo su aplicación a nivel masivo.

(Tessari, 2012)	de un vehículo y diseña la estrategia de control del mismo empleando técnicas de control híbrido, este proyecto gira en torno a reducir al máximo la cantidad de hidrógeno consumido, teniendo en cuenta que para llevar a cabo esta investigación se seleccionó una PEMFC debido a su rápida respuesta y baja temperatura de operación, también se tuvo en cuenta una fuente secundaria para lo cual se eligió una batería Li-Ion por su densidad energética.
(Rodríguez y Roa, 2012)	Diseñaron un sistema de control electromecánico conformado por una celda de combustible para sustituir las baterías de ácido-plomo en un vehículo convencional, el alternador está encargado de suministrar electricidad a la celda para que esta pueda realizar la conversión de energía, en este artículo uno de los objetivos principales es mejorar el rendimiento del sistema (mejorar la respuesta transitoria).
(Correa et al., 2014a)	Obtuvieron el modelo dinámico (por medio del diseño, dimensionamiento y simulación) de un vehículo eléctrico propulsado por pilas de combustible (hidrógeno) con su

	tren de potencias, el software usado para la simulación de las ecuaciones que rigen el proceso es MATLAB/Simulink porque permite el análisis de las variables (velocidad, tiempo y altitud) en estado transitorio. El auto fue diseñado para suplir las necesidades de la ciudad de Córdoba (Argentina).
(Muñoz <i>et al.</i> , 2014)	Los autores tomaron los resultados obtenidos de Correa <i>et al.</i> (2014a) para comparar el consumo de combustible y el rendimiento con un vehículo de combustión interna, los resultados de la comparación permiten afirmar que un auto de hidrógeno y baterías tiene un costo de combustible entre 50% - 60% en comparación con el de combustión interna en Córdoba (Argentina).
(Pesántez, 2014)	Diseñó una PEMFC para utilizarla en un vehículo de marca Toyota Prius modelo 2013, los resultados conseguidos permitieron evidenciar una similitud con los vehículos eléctricos, el proceso está dividido en dos partes, la primera parte analiza la obtención de la energía eléctrica (usada para obtener hidrógeno por electrólisis del agua) por medio de paneles solares utilizados, la segunda parte es el estudio de la PEMFC, generando esta electricidad que se suministra al motor eléctrico del auto.
(Mejía y Acevedo, 2015)	Hicieron una proyección del costo de una flota de 20 buses con PEMFC para el año 2025 en el Valle de Aburrá subregión del departamento de Antioquia (Colombia), establecieron costos por pasajero entre 478\$ - 773\$ para una empresa de transporte. Según Whitehouse <i>et al.</i> (2009) los autobuses que utilizan FC serán piezas claves en la conformación del transporte público en todas las ciudades del mundo para un futuro no muy lejano. Por otro lado, Hochgraf (2009) argumenta que desde 2008 los principales fabricantes de automóviles en Estados Unidos tienen flotas con tamaños desde una docena hasta más de cien vehículos

	propulsados por hidrógeno.
--	----------------------------

Tabla 3. Estudios sobre celdas de combustible en la industria del transporte (b)

(Juma y Martínez, 2015)	Diseñaron, construyeron e implementaron un sistema de producción de gas oxihidrógeno siendo suministrado a un motor cuatro tiempos marca Kawasaki modelo ZX 750F del vehículo monoplaza tipo Buggy, las pruebas hechas permitieron concluir que con el nuevo sistema dual gasolina – oxihidrógeno se registra un ahorro de combustible de 7,53%.
(Renau, 2016)	Hizo una investigación de una planta de potencia conformada por PEMFC para un vehículo aéreo no tripulado, uno de los principales requerimientos de este estudio es aumentar la altura de vuelo del avión ligero hasta los 10 km, los resultados obtenidos indican que según el diseño de la celda (teniendo en cuenta el peso de esta) y el tamaño del sistema de almacenamiento de gases, el dispositivo puede alcanzar la cota de 10 km.
(Casado, 2016)	En su proyecto realizó el cálculo y dimensionamiento para un sistema operado por una celda de combustible y una batería eléctrica, se utilizó un vehículo que fue adaptado conforme a los requerimientos energéticos del mismo, el sobrepeso calculado del automóvil de hidrógeno fue de 163 kg, este dato no es favorable debido a que influye en el desplazamiento.
(Pellissier, 2016)	Seleccionó e implementó una celda de combustible como planta motriz para una motocicleta tipo escúter del mercado colombiano, el eje del proyecto es el análisis de la célula por esta razón el autor afirma que HFC H-1000 ofrece la mejor relación entre peso, volumen y potencia.
(Turkmen <i>et al.</i> , 2016)	Modelan los sistemas de FC en automóviles y los comparan para posteriormente concluir que la

	potencia y el tipo de celda afecta el rendimiento del vehículo.
(Bizon y Thounthong, 2018)	Realizaron una comparación de dos estrategias (una óptima y otra subóptima) de energía híbrida para una pila de combustible, el mejor rendimiento se da con la estrategia óptima donde se obtuvo cinco litros de economía de combustible.
(Tahri et al., 2018)	Diseñan un sistema de administración de energía para aplicaciones automotrices y una estrategia de control para aplicarlo a una FC con un condensador, en los resultados obtenidos por medio de la simulación se logran los objetivos para los que fueron diseñados.
(Ustolin y Taccani, 2018)	Hacen un estudio para la utilización energética de las FC en la propulsión de drones, de acuerdo al análisis se logra definir entre los varios sistemas vistos al híbrido como el más conveniente en términos de peso para los perfiles de vuelo que requieran más energía.
(Ahmadi et al., 2018)	Diseñan los elementos del tren motriz de un vehículo eléctrico híbrido de FC teniendo en cuenta los sistemas FC/batería/ultracondensador, con los datos obtenidos de la simulación se registra una mejora en el rendimiento del vehículo.
(Fathabadi, 2018)	Propone una nueva fuente de alimentación híbrida FC (PEMFC de 900 kW) /supercondensador (600 F) utilizada en un vehículo eléctrico, los resultados demuestran una mayor eficiencia energética, velocidad y aceleración.
(Hu et al., 2018)	Proponen un modelo de predicción de la vida útil de las FC para estimar la durabilidad del combustible de la célula adoptada en un autobús, los resultados de la validación muestran que el modelo de degradación es creíble y robusto.
(Chen et al., 2018)	Hacen una investigación de los protocolos de prueba de durabilidad en FC,

	proporcionando una base teórica para establecer la durabilidad de las PEMFC y del combustible vehicular.
(Hames et al., 2018)	Presentan las mejores configuraciones de vehículos con FC de hidrógeno y estrategias de control para seguridad, concluyeron que la estrategia más favorable es ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy).

*(Fuente:**Autor).*

4.2 Sistemas Estacionarios de Potencia

Los diferentes tipos de celdas de combustible han facilitado su aplicación en sistemas estacionarios de

potencia como plantas que suministran energía en el orden de los kW y MW en zonas residenciales y comerciales (García, 2014).

Arévalo (2007) plantea la utilización de una MCFC para ser alimentada con biogás (11.500 m^3 diarios) producido por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre, en este diagnóstico se determina que es viable utilizar la celda previamente mencionada debido a que genera una potencia aproximada de 0.7 MW, superando la mínima potencia para el funcionamiento de la planta de 0.6 MW.

En el suministro de energía residencial con FC, de acuerdo con Jörissen (2009a) los principales avances se pueden ver reflejados en las PEMFC y SOFC. Es necesario tener en cuenta la apreciación de Perrin y Lemaire-Potteau (2009) entorno a las áreas residenciales alejadas, se plantea como prioridad el acceso a la electricidad para mejorar la calidad de vida por medio de las llamadas “Remote Area Power Supply” (“Fuente de Alimentación de Área Remota”).

García *et al.* (2011) realizan una evaluación de un sistema fotovoltaico (genera corriente usada en la electrólisis del agua para producir hidrógeno) con asistencia de red, se consideraron varias configuraciones para el sistema, la elegida para este análisis es la que acopla los paneles solares y el electrolizador a un bus de tensión continua e incluye conexión a la red eléctrica.

Harrabi *et al.* (2018) modelan y controlan dos generadores de energía; matriz fotovoltaica y FC, se establece un planteamiento de punto de máxima

potencia para mejorar el sistema fotovoltaico, por medio de la simulación se validan los algoritmos de control para ambos sistemas.

4.3 Sistemas Portátiles

La potencia que consumen los sistemas portátiles (oscilando entre los W y kW) es mucho menor que la de los sistemas estacionarios (kW y MW), aun así, las FC se convierten en un firme candidato para satisfacer las demandas energéticas de los primeros sistemas en el campo de la electrónica de consumo y la comunicación remota (García, 2014).

Lara *et al.* (2004) presentan el modelo matemático de un reactor-celda tipo PEM para un equipo portátil, uno de los requerimientos más importantes es el cálculo de la producción de hidrógeno, los resultados obtenidos evidencian el aprovechamiento del calor generado por la reacción para suministrarlo a hidrocarburos térmicos.

Kundu y Jang (2009) concluyen en sus estudios sobre FC en dispositivos portátiles del gran potencial de esta tecnología en la producción de micro-combustibles debido a que suministran mayor energía teniendo en cuenta el volumen y peso en comparación con las baterías convencionales. Teniendo en cuenta lo enunciado por Momma *et al.* (2009) otra área de aplicación de las FC miniatura es la medicina porque funcionan como fuentes generadoras de micro-potencia para equipos médicos.

4.4 Demás Estudios y Aplicaciones

La tabla 2 presenta un resumen de los trabajos hechos durante el año en curso (2018) con diferentes tipos de FC, estos estudios analizaron varios modelos matemáticos y distintos factores de envejecimiento.

Tabla 4. Estudios sobre celdas de combustible (modelamiento, eficiencia y envejecimiento) (a)

Autor	Contenido
(Ying <i>et al.</i> , 2018)	Realizaron una revisión del aumento en el rendimiento de las FC generado por las interacciones entre sílice (carga inorgánica más común) y varios polímeros, se deduce que los materiales de sílice actuales muestran una gran mejora en la conductividad del protón, mecánica y estabildades térmicas.
(Chino <i>et al.</i> , 2018)	Desarrollaron una FC de papel que funciona con urea, en las pruebas que hicieron determinaron la densidad de potencia (0.91 mW/cm^2), y la densidad de corriente máxima (4.3 mA/cm^2).
(Lu <i>et al.</i> , 2018)	Hicieron una revisión de forma detallada del sistema híbrido basado en la tecnología de FC y argumentan lo valiosos que son estos dispositivos principalmente por no producir gases de combustión tóxicos.

(Ploner et al., 2018)	Hicieron una parametrización del modelo de envejecimiento de una SOFC por datos experimentales, según los resultados obtenidos el modelo permite la predicción de envejecimiento en el rango de temperatura entre (700 – 850) °C.
(Xu et al., 2018)	Modelan de forma bidimensional todas las FC de óxido sólido poroso, como consecuencia se forma una base sólida para comprender estos fenómenos.
(Zhang et al., 2018)	Elaboraron una revisión de los factores que intervienen en la degradación en las PEMFC, con este análisis se busca proporcionar una base teórica para resolver este problema.
(Siddiqui y Dincer, 2018)	Realizaron una evaluación comparativa de las FC de amoníaco directo y analizan varios puntos de vista de estos dispositivos, se determina que un aumento de 200 °C en la temperatura de las SOFC alimentadas con amoníaco incrementa el pico densidad de potencia de casi tres a cuatro veces.
(De Souza et al., 2018)	Desarrollaron un modelo matemático para una FC de etanol directo, considerando el flujo y la concentración de especies vulnerables por el tiempo y espacio, el método de elementos finitos utilizado demostró ser útil para discretizar el flujo y las ecuaciones de las especies químicas.
(Spada et al., 2018)	Evaluación comparativa de riesgos en accidentes para el sector energético de los 28 países de la Unión Europea con énfasis en el hidrógeno y FC, se registran tasas de mortalidad más bajas con las tecnologías anteriormente mencionadas.

.(Fuente: Autor).

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el estado del arte previamente descrito de forma detallada por medio de las aplicaciones en la industria (transporte, sistemas estacionarios de potencia y sistemas portátiles) se dedujo y confirmó lo enunciado por Jörissen (2009b) al afirmar que una de las células con los principales avances son las PEMFC, por este motivo tienen más campo de aplicación siendo

reflejado en este artículo en los proyectos de Salazar (2008), Tessari (2012), Pesántez (2014), Mejía y Acevedo (2015), Renau (2016), y Lara *et al.* (2004) utilizando esta clase de celda como objeto de estudio.

Con respecto a la clasificación de las celdas de combustible, la eficiencia es el parámetro más influyente para establecer que son viables en la suministración energética de los procesos, el rango varía de 40% (PEMFC, DMFC y PAFC) pasando por 60% (MCFC) hasta 70% (AFC y SOFC), en los resultados obtenidos por Muñoz *et al.* (2014) se determinó un costo de combustible entre 50% - 60% menor en un vehículo propulsado por FC en comparación con un vehículo de combustión interna.

Las celdas de combustible son una tecnología innovadora, ambientalista y futurista, pero esto no la excluye de tener limitaciones o desventajas debido al sobrepeso generado en algunos casos en los sistemas donde se utilicen estos dispositivos, así lo evidenció Casado (2016) habiendo empleado una celda y una batería eléctrica en un vehículo con un sobrepeso registrado de 163 kg, este dato impidió el desplazamiento del automóvil con mayor rapidez.

REFERENCIAS

- Aguilar, E. R. (2015). *Modelamiento y Simulación de la Producción de Hidrógeno en un Electrolizador a partir de Vapor Sobrecalentado de Agua*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10590>
- Ahmadi, S. (2018). *Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy*. Energy Conversion and Management, 160 (January), 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.020>
- Appleby, A. J. (2009). *Fuel Cells*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 76–107. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00345-2>
- Arévalo, C. P. (2007). *Estudio de Prefactibilidad para la Implementación de un Sistema de Generación Distribuida con Celda de Combustible en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre Bogotá*. Retrieved from <http://autoorganizacioncreativa.net/FelipeRiv>

- as-AutoorganizacionCreativa-2010.pdf
- Benz, U. (2009). *Uninterruptible and Back-up Power: Fuel Cells*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 135–145. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00347-6>
- Bizon, N. y Thounthong, P. (2018). *Fuel economy using the global optimization of the Fuel Cell Hybrid Power Systems*. Energy Conversion and Management, 173(April), 665–678. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.015>
- Cabot, P. L. (2013). *Applications - Stationary / Cogeneration of Energy and Chemicals: Fuel Cells*. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, 146–156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.01106-9>
- Casado, D. D. (2016). *Dimensionado y Evaluación de un Vehículo Automóvil Basado en una Pila de Combustible con Almacenamiento a Bordo de Hidrógeno*. Retrieved from <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/18152>
- Castellanos, N. S. y Molina, M. O. (2013). *Modelado y simulación de una celda de combustible reversible de membrana polimerica para la producción de hidrógeno*. Retrieved from <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/91>
- Chen, H. (2018). *A review of durability test protocols of the proton exchange membrane fuel cells for vehicle*. Applied Energy, 224 (November 2017), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.050>
- Chino, I. (2018). *A paper microfluidic fuel cell powered by urea*. Journal of Power Sources, 396 (June), 710–714. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.06.082>
- Correa, G. (2014a). *Dimensionamiento y Modelado de un Vehículo Eléctrico Propulsado por Pilas de Combustible. Análisis Económico y de Factibilidad*. Revista de La Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1 (1), 8. Retrieved from <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/6865>
- Correa, G. (2014b). *Dimensionamiento y Modelado de un Vehículo Eléctrico Propulsado por Pilas de Combustible. Análisis Económico y de Factibilidad*. Revista de La Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1 (1), 8.
- Creemers, C. (2009). *Military : Batteries and Fuel Cells*. Elsevier B.V, 13–21.
- De Souza, M. M. (2018). *A model for direct ethanol fuel cells considering variations in the concentration of the species*. International Journal of Hydrogen Energy, 43(29),13475–13488. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.096>
- E Florez, CAP Cortes..., (2017), *Aplicación del método de la ecuación de Boltzmann en redes para la simulación bidimensional de un problema típico de mecánica de fluidos* Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada ISSN: 1692-7257.
- Fathabadi, H. (2018). *Fuel cell hybrid electric vehicle (FCHEV): Novel fuel cell/SC hybrid power generation system*. Energy Conversion and Management, 156 (November 2017), 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.001>
- Fernández, M. C. (2009). *Celdas de combustible*.
- Franco, C. J. y Baena, A. I. (2010). *Dinámica de la Penetración de Tecnologías Alternativas para Vehículos Automotores y su Impacto en las Concentraciones de Carbono Atmosférico*. Revista en Sistemas e Informática, 7(2) (Diciembre 2010).
- García, A. (2014). *Fuentes de Energías Alternas : Teoría y Práctica*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/301302122>
- García, J. G. (2011). *Control de un Sistema Fotovoltaico con Asistencia de Red para la Producción de Hidrógeno. Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia*, (pp. 399–404).
- Hames, Y. (2018). *Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles*. International Journal of Hydrogen Energy, 43 (23), 10810–10821. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.150>
- Harrabi, N. (2018). *Modeling and control of photovoltaic and fuel cell based alternative power systems*. International Journal of Hydrogen Energy, 43 (25), 11442–11451. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.012>
- Henne, R. H. y Friedrich, K. A. (2009). *Applications - Transportation/ Auxiliary Power Units: Fuel Cells*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 157–173. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00369-5>

- Hochgraf, C. (2009). *Electric Vehicles: Fuel Cells*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 236–248. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00863-7>
- Hu, Z. (2018). *A reconstructed fuel cell life-prediction model for a fuel cell hybrid city bus*. Energy Conversion and Management, 156 (November 2017), 723–732. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.069>
- Jörissen, L. (2009a). *Residential Energy Supply: Fuel Cells*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 108–123. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00346-4>
- Jörissen, L. (2009b). *Residential Energy Supply: Fuel Cells*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 108–123. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00346-4>
- Juma, D. A. y Martínez, H. W. (2015). *Diseño e Instalación de un Sistema De Alimentación Gasolina – HHO en el Motor de Combustión Interna del Vehículo Monoplaza Tipo Buggy del Laboratorio de Mecánica de Patio de La Espe Extensión Latacunga*.
- Kundu, A. y Jang, J. (2009). *Portable Devices : Fuel Cells*. Elsevier B.V, 39–45.
- Lara, R. (2004). *Diseño Conceptual de un Sistema Reactor-Celda de Combustible Tipo PEM para Equipo Portátil*. Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo, 1, 188–194.
- López, J. R. (2010). *Modelo Dinámico de un Electrolizador Alcalino*.
- Lu, Y. (2018). *Solid oxide fuel cell technology for sustainable development in China: An overview*. International Journal of Hydrogen Energy, 43(28), 12870–12891. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.008>
- Mejía, J. G. y Acevedo, C. A. (2015). *Determinación del costo de una flota de buses con celdas de combustible para el horizonte 2025 en el Valle de Aburrá*. Scientia et Technica, 20(3) (Septiembre 2015), 247–255.
- Miller, A. R. (2009). *Rail Vehicles : Fuel Cells*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 313–322.
- Momma, T. (2009). *Micro Hybrid Power System: Fuel Cells/Capacitors*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 1–12. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00892-3>
- Muñoz, P. M. (2014). *Selección y Dimensionamiento de un Vehículo Eléctrico Híbrido Propulsado por Celdas de Combustible. Comparación y Análisis con un Vehículo de Combustión Interna*. 2014 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2014, (July 2015), 804–809. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2014.6868592>
- Pellissier, C. (2016). *Análisis de la Implementación de una Celda de Combustible en una Motocicleta Tipo Escúter*.
- Perrin, M. y Lemaire-Potteau, E. (2009). *Remote Area Power Supply: Batteries and Fuel Cells*. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 65–75. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00381-6>
- Pesántez, L. F. (2014). *Análisis del Funcionamiento de los Vehículos con Celdas de Combustible de Hidrógeno y con Paneles Solares*.
- Ploner, A. (2018). *Classical statistical methodology for accelerated testing of Solid Oxide Fuel Cells*. Journal of Power Sources, 395 (April), 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.034>
- Renau, J. (2016). *Diseño de una Planta de Potencia Basada en Pila de Combustible para un Vehículo Aéreo no Tripulado de Elevada Altitud*.
- Rodríguez, J. A. y Roa, S. (2012). *Sistema de Generación Eléctrica con Celdas de Combustible en Vehículos Convencionales*.
- Salazar, W. E. (2008). *Estudio Preliminar de una Motocicleta Energizada con Celda de Combustible Tipo PEM*.
- Siddiqui, O. y Dincer, I. (2018). *A review and comparative assessment of direct ammonia fuel cells*. Thermal Science and Engineering Progress, 5 (August 2017), 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.02.011>
- Simbaña, J. A. (2016). *Modelado, Simulación y Optimización de la Producción de Hidrógeno en un Electrolizador a partir de Vapor Sobrecalentado de Agua Mediante la Herramienta LabView de National Instruments*. Retrieved from file:///C:/Users/HOGAR/Downloads/CD-2042.pdf
- Spada, M. (2018). *Comparative risk assessment with focus on hydrogen and selected fuel cells: Application to Europe*. International Journal of Hydrogen Energy, 43 (19), 9470–9481.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.004>
- Tahri, A. (2018). *Management of fuel cell power and supercapacitor state-of-charge for electric vehicles*. *Electric Power Systems Research*, 160, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.02.003>
- Tessari, G. (2012). *Modelado y Control de un Vehículo Híbrido Basado en Pilas de Combustible*.
- Turkmen, A. C. (2016). *Analysis of fuel cell vehicles with advisor software*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 (December 2016), 1066–1071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.011>
- Ustolin, F. y Taccani, R. (2018). *Fuel cells for airborne usage: Energy storage comparison*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (26), 11853–11861. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.017>
- Velásquez, J. D. y Quiceno, J. F. (2013). *Diseño de un Sistema de Generación de Hidrógeno por Electrólisis*. UniTecPereira.
- Whitehouse, N. (2009). *Buses: Fuel Cells*. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 193–202. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00338-5>
- Winkler, W. (2009). *Ships: Fuel Cells*. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 338–358. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00340-3>
- Xu, H. (2018). *Modeling of all porous solid oxide fuel cells*. *Applied Energy*, 219 (February), 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.037>
- Ying, Y. P. (2018). *Silica-related membranes in fuel cell applications: An overview*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.171>
- Zhang, T. (2018). *A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition*. *Applied Energy*, 223 (January), 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.049>

ANEXOS

Símbolos

H_2 : Hidrógeno puro.

HHO : Oxihidrógeno.
 KOH : Hidróxido de potasio.
 OH^- : Ion hidroxilo.
 H^+ : Ion hidrógeno.
 H_2O : Agua pura.
 O^{2-} : Ion óxido.
 O_2 : Oxígeno puro.
 CH_3OH : Metanol.
 CO_3^{2-} : Iones carbonato.
 CO : Monóxido de carbono.
 CH_4 : Metano.
 Li_2CO_3 : Carbonato de litio.
 K_2CO_3 : Carbonato potásico.
 SiC : Carburo de silicio.
 CO_2 : Dióxido de carbono.
 Li : Litio.
 e^- : Electrones.
 A : Corriente eléctrica.
 V : Voltaje.
 W : Potencia.
 F : Faradios.
 m : metros.
 $^{\circ}C$: Grados Celsius.

Acrónimos

NASA: National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio).
 FC: Fuel Cells (Celdas de Combustible).
 AFC: Alkaline Fuel Cells (Celdas de Combustible Alcalina).
 PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cells (Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico).
 PEFC: (Celdas de Combustible de Metanol Directo).
 DMFC: Direct Methanol Fuel Cells (Celdas de Combustible de Metanol Directo).
 RMFC: Reformed Methanol Fuel Cells (celdas de combustible de metanol reformado).
 PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cells (Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico).
 MCFC: Molten Carbonate Fuel Cells (Celdas de Combustible de Carbonato Fundido).
 SOFC: Solid Oxide Fuel Cells (Celdas de Combustible de Óxido Sólido).
 ECMS: Equivalent Consumption Minimization Strategy (Estrategia de minimización de consumo equivalente).
 PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.