



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TÍTULO

**CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN APILAMIENTO DE
CELDAS DE COMBUSTIBLE PARA SU USO EN SISTEMAS DE
RECARGA ELÉCTRICA PORTÁTIL**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

PRESENTA

JESÚS RAFAEL GUDIÑO ESQUIVEL

DIRECTOR DE TESIS

DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

ASESORES

DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

DRA. BEATRIZ ESCOBAR MORALES

DR. GUILLERMO BECERRA NUÑEZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO
"CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN APILAMIENTO DE CELDAS DE
COMBUSTIBLE PARA SU USO EN SISTEMAS DE RECARGA ELÉCTRICA PORTÁTIL"

ELABORADO POR
JESÚS RAFAEL GUDIÑO ESQUIVEL

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:


DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

ASESOR:


DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

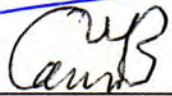
ASESOR:


DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

ASESORA:


DRA. BEATRIZ ESCOBAR MORALES

ASESOR:


DR. GUILLERMO BECERRA NUÑEZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018

Contenido

Introducción.....	6
Justificación.....	6
Objetivo general.....	7
Objetivos particulares	7
Capítulo 1. Celdas de combustible	8
1.1 El hidrógeno como combustible.....	8
1.2. Celda de combustible (CC).....	9
1.2.1. Fundamentos de operación de la CC	10
1.2.2. Componentes principales de la PEMFC	12
1.2.3. Membrana de intercambio protónico	12
1.2.4. Capas catalíticas	12
1.2.5. Difusores de gas	13
1.2.6. Sello.....	13
1.2.7. Placas de flujo bipolares	13
1.2.8. Canales de flujo	13
1.3. Celdas de combustible milimétricas	14
1.4. Ventajas y aplicaciones de la mili-CC.....	15
Capítulo 2. Estado del arte	17
2.1. Tendencias de la investigación	17
2.2 Apilamiento.....	24
2.3 Dimensionamiento del apilamiento	26
2.4 Técnicas de caracterización.....	27
2.4.1 Curvas de polarización.....	27
2.4.2 Cronoamperometría	27
Capítulo 3. Diseño de la mili-PEMFC	28
3.1. Definición del diseño.....	28
3.2. Materiales utilizados	28
3.3. Manufactura de componentes.....	29
3.3.1. Manufactura de la Membrana con capa catalítica (CCM).....	30
3.3.2. Manufactura electrodos	31
3.3.3. Manufactura de sellos	32

3.3.4. Ensamblado directo por capas	32
3.4. Descripción de los prototipos	32
Capítulo 4. Resultados.....	35
4.1. Respuesta eléctrica de la celda construida.....	35
4.2. Dimensionamiento para sistemas de recarga eléctrica portátil	41
Conclusiones	44
Perspectivas	44
Referencias.....	45

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi comité de tesis: Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool, Dr. Víctor Sánchez Huerta Dr. José Hernández, Dra. Beatriz Escobar Morales y Dr. Guillermo Becerra Núñez. Especialmente al Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool y a la Dra. Beatriz Escobar Morales por apoyo para la mejora del mano escrito y apoyo académico.

Un especial agradecimiento al CONACYT, por la beca otorgada a través del proyecto “Estudio de Inteligencia Tecnológica para el Desarrollo de un Sistema Portátil de Celdas de Combustible para Aplicaciones en Desastres Naturales” con clave 213373 y al apoyo para fabricación de la celda del proyecto “Consolidación del Laboratorio de Energías Renovables del Sureste (LENERSE)” con clave FSE-2014-01-25466.

Introducción

La energía eléctrica es un elemento vital para el desarrollo tecnológico, social y económico, de todas las naciones, tan vital, que ha sido el motivo principal de las guerras internacionales. La creciente demanda de energía la dependencia mundial de combustibles fósiles ha aumentado notablemente, como consecuencia se ha incrementado la contaminación ambiental. Es necesario contribuir a que se evite el daño que se ha hecho, por lo tanto, es urgente acelerar el desarrollo de nuevas tecnologías para garantizar la demanda de energía eléctrica de la sociedad de manera sustentable en cualquier parte del mundo. En los últimos años se han realizado esfuerzos significativos en la búsqueda de alternativas para la generación de energía que sean más amigables con el medio ambiente. Una de las tecnologías más factibles para alcanzar mayores eficiencias y menor impacto ambiental se centra en el aprovechamiento del hidrógeno como vector energético [1].

Las celdas de combustible (CC), dispositivos que generan energía con una alta eficiencia energética y bajo impacto ambiental a partir de reacciones electroquímicas y utilizando al hidrógeno como combustible, representan una alternativa prometedora de energía limpia, en particular, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), estas son más versátiles por su peso ligero y fácil transporte. Además de su sencillez y su perspectiva limpia y eficiente, las celdas de combustible, especialmente las PEMFC de tamaño milimétrico ofrecen una relación superficie-volumen alta para el aprovechamiento de la energía generada, además de presentar diseños innovadores. Entre sus características se encuentran, áreas efectivas relativamente pequeñas, novedosos diseños de las conexiones eléctricas y materiales ligeros [2].

Finalmente, ya que la mili-celda tipo PEM (mili- CC) es más compacta, se espera que en un corto plazo responda a la alta demanda de aplicación para sistemas portátiles, donde se requieren fuentes de energía que aporten más potencia con menos volumen y peso. En este trabajo, se desarrolló una mili-celda de combustible para aplicaciones portátiles. Las condiciones de operación de la mili-PEMFC auto-respirable son, temperatura ambiente y presión relativamente baja de hidrógeno, con el objetivo de lograr máxima potencia con el mínimo tamaño y peso.

Justificación

En la actualidad la portabilidad y la movilidad de los dispositivos electrónicos es imprescindible en la vida diaria para la mayoría de la población en los países desarrollados. La tendencia indica la necesidad imperante de desarrollar aparatos electrónicos portátiles cada vez más pequeños y livianos, con esta disminución de tamaño se pensaría que la potencia requerida por los dispositivos vendría a la baja, pero ocurre exactamente lo contrario, ya que las nuevas y variadas aplicaciones que ofrecen estos aparatos requieren de un mayor consumo de energía. Otro de los requerimientos importantes en su diseño es la creciente necesidad en la cantidad de almacenamiento de

energía que permita un buen desempeño por un tiempo prolongado, se sabe que la gran mayoría de dispositivos portátiles como los teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, reproductores de música, tabletas electrónicas, etc., usan baterías de ion litio, las cuales están limitadas por diferentes factores como ciclos de carga/descarga, son altamente contaminantes, requieren largos tiempos de carga, etc. [3]. En los últimos años se han realizado esfuerzos significativos en la búsqueda de alternativas para la generación de energía que sean más amigables con el medio ambiente. Una de las tecnologías más factibles que presentan un gran potencial y menor impacto ambiental es la celda de combustible que mediante el uso de hidrógeno como vector energético, es considerada una fuente eficiente y limpia de energía, no sufren del efecto memoria del proceso de carga y descarga, lo cual es un problema conocido de las baterías.

Otra de las ventajas que presenta, se refiere al tiempo largo de carga que requieren las baterías, mientras que en la CC una reposición del tanque de combustible puede ser realizada fácilmente para seguir aprovechando el suministro de energía de las celdas. Estas características justifican el diseño y validación de una mili-CC auto-respirable de alta densidad de potencia eléctrica ya que representa una alternativa altamente prometedora para aplicaciones portátiles en dispositivos modernos.

Objetivo general

Desarrollar un apilamiento de celdas de combustible para su posible aplicación en sistemas portátiles, mediante la caracterización de su respuesta eléctrica en curvas de polarización.

Objetivos particulares

1. Mejorar el diseño actual del prototipo de mili-celda de combustible auto respirable tipo PEM, considerando aumentar su potencia.
2. Desarrollar los componentes requeridos para manufacturar y validar experimentalmente el diseño propuesto.
3. Caracterización eléctrica de la monocelda y del apilamiento de mili-celdas de combustible de hidrógeno.

Capítulo 1. Celdas de combustible

1.1 El hidrógeno como combustible

Hoy en día la energía es uno de los temas más importantes y preocupantes, el rápido crecimiento de la población es uno de los principales factores que están por detrás de la creciente demanda. El problema radica en el incremento en la demanda de energía y la escasez de combustibles fósiles, aunado a la generación de gases de efecto invernadero que provoca el cambio climático a nivel mundial, así como el impacto negativo en la salud humana. Existe la urgencia de buscar alternativas de generación de energía limpia que reemplacen a los combustibles fósiles, mediante la utilización de energías renovables a nivel mundial se podría dar parcialmente solución a este problema. Sin embargo, las granjas de generación de energía renovables por lo general están lejos del sitio de demanda y el transporte de la energía es el inconveniente, esto sin considerar la naturaleza intermitente lo que ocasiona una generación impredecible y fluctuación entre las fuentes de energía renovables. Otro problema que se presenta al utilizar la energía renovable es la no coincidencia con la generación y la demanda energética, por lo cual el almacenamiento de energía es la solución. Actualmente la energía se puede almacenar de distintas formas, ya sea por baterías, aire comprimido, capacitores y el hidrógeno, el cual se considera el combustible del futuro [4].

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el planeta y se puede obtener de varias formas, como lo son los elementos primarios: agua, biomasa, gas natural, entre otros. Este combustible posee una densidad de energía de 120 MJ/kg, mientras que el diésel y la gasolina poseen alrededor de 46 MJ/kg, sin embargo, la densidad volumétrica del hidrógeno es mucho menor que la de los combustibles mencionados con anterioridad [5].

En la figura 1.1 se ejemplifican los procesos de obtención, producción, almacenamiento, transporte y utilidades más comunes en la ruta que abarca desde la producción hasta la utilización del hidrógeno.

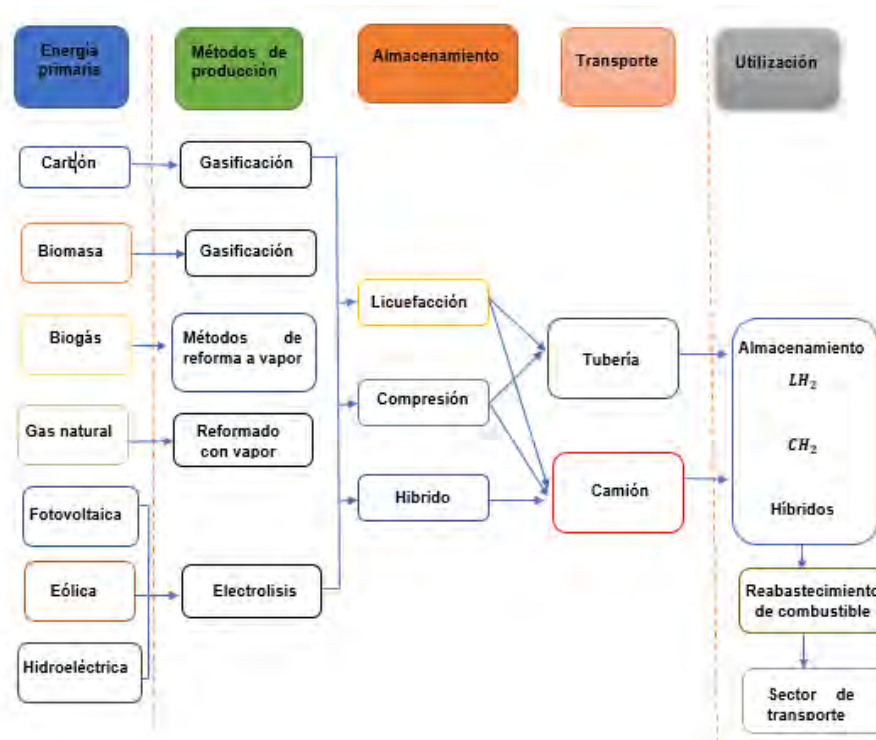


Figura 1.1 Procesos requeridos para la producción y manejo del hidrógeno [6].

De acuerdo con la *Energy Information Administration* (EIA) de los Estados Unidos, el sector del transporte ocupa aproximadamente el 55% de energía del mundo y genera el 30.9% de emisiones de dióxido de carbono, esto dato fue registrado el año 2014. El sector de transporte a nivel mundial se basa principalmente en el consumo de combustibles fósiles, debido a la utilización masiva de estos energéticos se les responsabiliza del calentamiento global, contaminación del aire y adelgazamiento de la capa de ozono. Nuevas tecnologías se han implementado en los automóviles para la sustitución de los combustibles fósiles, los fabricantes de automóviles han implementado baterías, ultracapacitores y celdas de combustible para la alimentación del vehículo [7]. Esta última tecnología utiliza el hidrógeno como combustible, que al ser quemado no produce CO, CO₂, SO_x, tampoco el hollín, debido a que no contiene azufre ni carbono, considerando al hidrógeno como un elemento no tóxico [8].

1.2. Celda de combustible (CC)

La celda de combustible fue inventada hace más de 150 años por Sir William Grove y le llamo "gaseous voltaic battery" cuando descubrió que podría generarse electricidad al revertir la electrólisis del agua con hidrógeno y oxígeno. Las CC son dispositivos que transforman la energía química de combustibles como el hidrógeno en electricidad de corriente continua mediante una reacción con el oxígeno. Debido a que en estos dispositivos se realiza una reacción química la cual no implica combustión son más eficientes y silenciosas que un generador a combustión, además de considerarse como energía limpia ya que los residuos son únicamente calor y agua, emite bajas emisiones químicas, térmicas y de dióxido de carbono, haciéndola una tecnología muy atractiva para la reducción de emisiones de carbono.

A diferencia de las baterías las CC producen energía eléctrica continua siempre y cuando se suministre de forma continua el oxidante y el combustible, mientras tanto en una batería la energía almacenada se ve limitada por la cantidad de reactivo químico que contiene. En la figura 1.2 se muestra un esquema general de una CC.

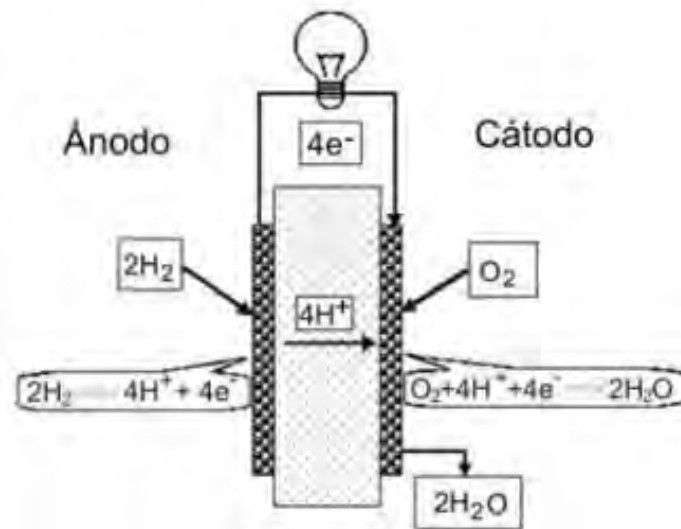


Figura 1.2 Esquema de una celda de combustible [9].

Debido a su baja temperatura de funcionamiento, mínimo ruido, arranque más rápido, densidad de potencia alta, las PEMFC (proton exchange membrane fuel cells) se han convertido en las CC más sobresalientes en el mercado de la investigación. Este tipo de celdas se han utilizado para generar energía en hospitales, hoteles, edificios y oficinas, debido a que son más ligeras y pequeñas que unas baterías. Tienen una vida mucho más prolongada y no necesitan conectarse a la red para recargarse, se han utilizado en dispositivos portátiles como lo son laptops, teléfonos celulares, grabadoras, etc. [10].

1.2.1. Fundamentos de operación de la CC

Las celdas de combustible son dispositivos que se componen por una capa de electrolito en contacto con dos electrodos porosos, ambos electrodos contienen catalizadores con la finalidad de acelerar el proceso electroquímico. La operación de las celdas de combustible es la situación inversa del proceso de electrólisis, el hidrógeno y el oxígeno se combinan produciendo una corriente eléctrica junto con agua y calor. A continuación, en la ecuación 1 se describe la reacción global en una CC.



Se puede distinguir dos tipos de CC, esto de acuerdo con el tipo de electrolito que use ya sea alcalinos o ácidos. El portador de carga es la diferencia entre estas celdas de combustible, positivo para las celdas de combustible de electrolito ácido y negativo para las de electrolito alcalino. El hidrógeno se reduce al entrar al ánodo de la CC de electrolito ácido, esta reacción libera electrones, crea iones H^+ y libera energía, mientras que en el cátodo el oxígeno reacciona con los electrones generados en el ánodo y conducidos al cátodo por medio del circuito externo y los iones del electrolito, dando como resultado agua. Para que las reacciones continúen sin parar los reactivos deben ser suministrados todo el tiempo del funcionamiento de la celda. En la figura 1.3 se observa el

funcionamiento de una celda de combustible tipo PEM donde en el cátodo se realiza la reducción y en el ánodo la oxidación.

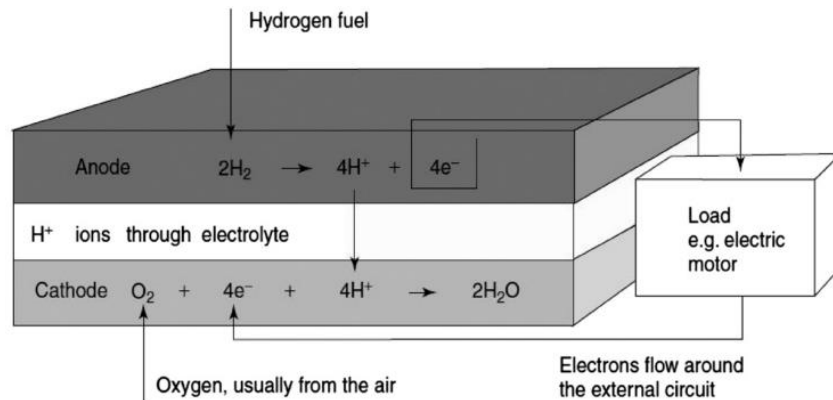


Figura 1.3. Celda de combustible de electrolito ácido [11].

En una celda de combustible que utiliza electrolito alcalino, los iones cedidos en el cátodo son hidroxilo (OH^-), estos reaccionan en el ánodo con el hidrógeno liberando electricidad y produciendo agua. En el cátodo el oxígeno reacciona con electrones que producen nuevos iones.

El rendimiento en una PEMFC se puede representar mediante una curva que caracteriza la salida de tensión de la celda en función de una densidad de corriente. La curva perfecta es una línea recta a 1.23 V, sin embargo, las CC tienen muchas pérdidas, las cuales se mencionan a continuación.

- 1 Pérdidas cinéticas; esto ocurre debido a la mala cinética de los electrodos, esto se puede mejorar por las características de la capa electrocatalítica.
- 2 Pérdidas óhmicas; generadas por las resistencias de los componentes de la CC.
- 3 Pérdidas por transporte de masa; sucede debido a que el agua que se genera bloquea los canales provocando una limitada difusión de gases.

En la figura 1.4 se presenta la curva (I-V) donde se observan las pérdidas mencionadas con anterioridad.

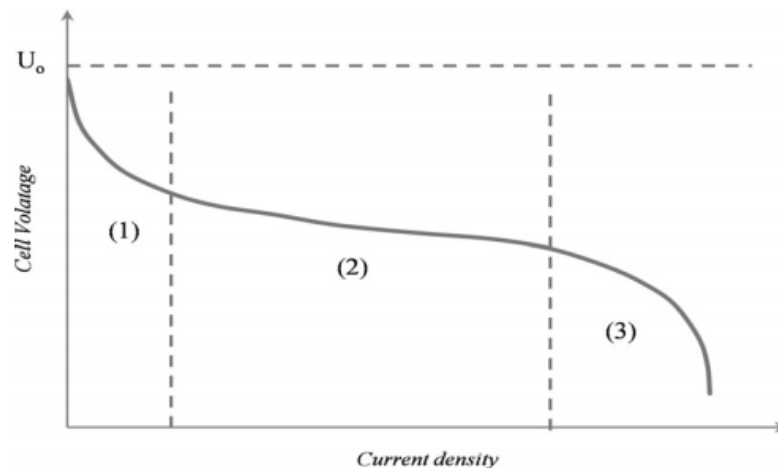


Figura 1.4 Curva (V-I) se puede observar las pérdidas [12].

1.2.2. Componentes principales de la PEMFC

En los últimos años las PEMFC han pasado de la fase de demostración a la comercialización debido los grandes esfuerzos en la investigación. Este tipo de CC se considera la tecnología sin emisiones que solucionará los requisitos de la energía del siglo XXI. A continuación, en la figura 1.5 se muestra un esquema de los principales componentes de una celda de combustible tipo PEM.

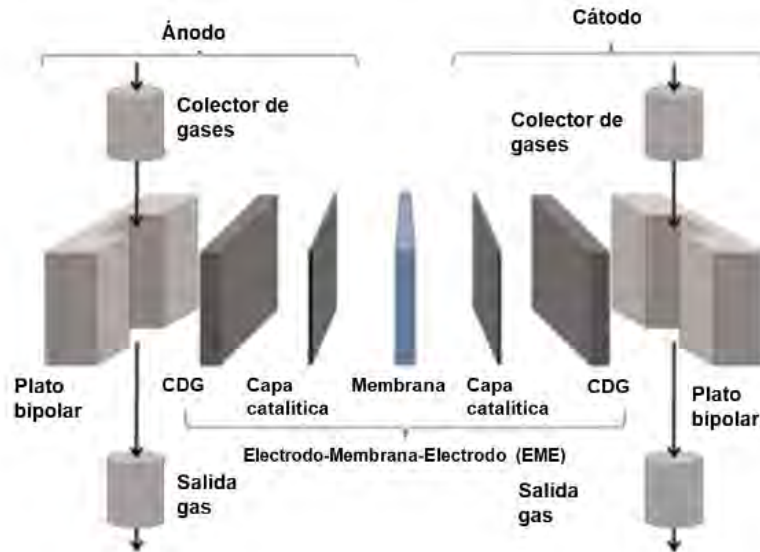


Figura 1.5 Componentes de una celda de combustible tipo PEM [13].

1.2.3. Membrana de intercambio protónico

La característica principal de una membrana de intercambio protónico como su nombre lo indica, debe de conducir protones de modo que la conductividad iónica sea la característica más importante del material. Además, la membrana debe de reunir otras funciones como lo son resistir a los ataques químicos, ser robusta, duradera, entre otros. El tipo de material del que está hecha la membrana dependerá el rango de operación de una CC, por lo general una PEMFC tiene un rango de temperatura de operación inferior a los 100 °C, por tal motivo los polímeros sulfonados como el Nafion son los materiales más utilizados en este tipo de celdas.

Aunque el Nafion sea uno de los mejores materiales empleados para la fabricación de membranas presenta aun grandes retos que se intentan resolver día con día. Este material es muy caro, aproximadamente 700 dólares/m² además su conductividad protónica depende del contenido de agua que contenga la membrana, no puede operar a altas temperaturas y presenta una contracción e hinchazón durante la operación debido a los cambios en la humedad por la absorción de agua.

1.2.4. Capas catalíticas

Una capa catalítica debe de ser capaz de iniciar la separación del hidrógeno en el lado del ánodo y acelerar la reducción del oxígeno en el lado del cátodo, entonces los electrones producidos en el ánodo viajan a través de un circuito externo para producir una corriente

mientras que los protones atraviesan la membrana hacia lado del cátodo para combinarse con el oxígeno y los electrones para producir agua y calor.

Para una PEMFC que funciona con hidrógeno puro y aire, el platino es utilizado como catalizador debido a que es un metal noble y activo. Sin embargo, el reto para los catalizadores basados en este metal surge cuando el hidrógeno no es de alta pureza y contiene monóxido residual por lo que la capa catalítica se envenena ocasionando una degradación constante en el rendimiento de la CC. Para solucionar los problemas con el envenenamiento se sugiere hacer aleaciones de platino con rutenio (Pt-Ru), ya que al añadir el Ru se eliminan los efectos de electroxidación por monóxido residual y mejora el rendimiento de la CC. Para disminuir el costo de una PEMFC y hacer una producción en masa se pueden hacer aleaciones del platino con metales de bajo costo o bien utilizar cantidades menores de este elemento.

1.2.5. Difusores de gas

La capa de difusores de gas es una capa externa al conjunto que componen la MEA, es más gruesa que la capa catalítica y se coloca entre los campos de flujo y las capas catalíticas. La GDL (gas diffusion layer) brinda soporte mecánico para la membrana y estructura catalítica, conduce electrones entre las placas bipolares y electrodos, protege la capa catalítica de erosiones o corrosiones de los flujos, contribuye a la eliminación de agua y calor, por último, ayuda a dispersar los reactivos en los campos de flujo sobre la capa catalítica. Una GDL debe tener alta conductividad térmica y electrónica ser poroso e hidrofóbico. Los materiales normalmente usados para difusores de gas son papel de fibra de carbón y tela de carbono; recientes investigaciones demuestran que la tela de carbón presenta mejor desempeño que el papel a densidades de corriente mayores a 0.5 A/cm^2 .

1.2.6. Sello

Es un empaque de materiales que resisten a la temperatura, esfuerzos mecánicos y reacciones químicas en la celda de combustible, tiene como objetivo principal conservar el proceso electroquímico y evitar fugas. Normalmente los empaques utilizados son de materiales como el Teflón, silicón u otros materiales plásticos.

1.2.7. Placas de flujo bipolares

Las placas de flujo bipolares son utilizadas en el ánodo y cátodo de una PEMFC, estas placas tienen varias funciones entre las cuales se pueden mencionar; distribuir el combustible y oxidantes a sitios reactivos, recolectar la corriente producida, eliminar los productos debido a la reacción y el calor, además brinda soporte mecánico y facilita la gestión del agua a través de la celda. Además, las placas bipolares deben de tener un diseño que brinde una distribución eficiente tanto del combustible como del oxidante a la capa catalítica, si el diseño es adecuado, puede aumentar la utilización de catalizador, mejorar la gestión del agua en la celda y la recolección de corriente [14].

1.2.8. Canales de flujo

Los canales de flujo de gas en una CC suministran y distribuyen el combustible de hidrógeno y oxígeno para las reacciones, posteriormente eliminan el agua de los

subproductos. Estos canales están ubicados dentro de las placas bipolares, en una sección transversal de alrededor de 1 mm. Se han estudiado varios tipos de campos de flujo entre los cuales se encuentran los paralelos, serpentinos, pin-type, diseños de medios inter dirigidos y porosos [1].

1.3. Celdas de combustible milimétricas

La creciente demanda de calidad, densidad y rendimiento en el tiempo de suministro de energía es la principal fuerza impulsora en el mercado de producción de energía portátil, que incluye muchos crecientes productos. Hoy en día la competencia entre diferentes tecnologías tiene una gran competencia por mejorar el tamaño del producto, hacerlo más ligero y barato con un número creciente de funciones.

Del lado de las telecomunicaciones, las computadoras y el internet, se han vuelto parte de la vida cotidiana del ser humano, por tal motivo es esencial un suministro de energía confiable. Debido a lo mencionado con anterioridad, una celda de combustible es apropiada como sistema portátil de energía debido a que tiene buenos desempeños en densidad de potencia, es barata, durable y de bajo costo.

Las CC se centran en dos mercados, el primero en generadores de energía portátiles diseñados para usos personales y ligeros, el segundo mercado se enfoca para electrónica de dispositivos móviles, figura 1.5



Figura 1.5 Aplicaciones para celda de combustible portátil.

De acuerdo con los progresos que ha tenido la tecnología la batería no ha logrado hacer frente a este crecimiento rápido, por lo que los científicos han decidido buscar otras alternativas como las celdas de combustible. Las CC son aplicables a la vida cotidiana debido a sus ventajas de carga instantánea, basta con remplazar el cartucho de hidrógeno agotado para seguir teniendo energía.

Las CC son considerada el gran rival para las baterías de litio, ya que la tecnología para las CC se encuentra en desarrollo y ha demostrado alto potencial de rendimiento. Países fuertemente industrializados están optando por las CC, ya que esta tiene un campo amplio de aplicaciones por ejemplo en microsistemas, vehículos aéreos, micro robots y nano satélites los cuales se caracterizan por una demanda alta en densidad de energía con el propósito de extender su operación en largos periodos de tiempo. Las CC también

son utilizadas en dispositivos electrónicos portátiles como, teléfonos, cámaras, reproductores mp3, notebooks, los cuales están requiriendo día con día mayor demanda de energía debido al incremento de la multifuncionalidad que brinda el dispositivo.

Todas las aplicaciones mencionadas requieren una fuente de energía confiable, siendo un campo de una oportunidad para las celdas de combustible, por lo tanto, es necesario mejorar la eficiencia y durabilidad de las mili- CC auto-respirables para que puedan en un mediano plazo competir con las baterías convencionales.

Las mili-celdas de combustible auto-respirables (mili-CC) tienen la característica de proporcionar mayor energía ya que su densidad de energía es superior al de las baterías convencionales. Estas mili- CC auto-respirables tipo PEM son muy prometedoras ya que su rendimiento es alto a bajas temperaturas. Cualquier celda auto respirable que proporcione menos de 50 W de energía es considerada una mili celda. Por lo general un teléfono inteligente requiere una potencia de 0.1- 3 W, una computadora portátil de 5-50 W, una cámara digital de 5-20 W, entre otras aplicaciones.

1.4. Ventajas y aplicaciones de la mili-CC

Las mili-celdas de combustible auto-respirables tiene una gran ventaja que pueden ser apiladas formando un conjunto llamado stack, este nuevo conjunto se caracteriza por incrementar la potencia eléctrica. Los componentes de las mili-CC también pueden separarse en dos o más partes según el diseño. Esta modularidad permite una mayor flexibilidad tanto en el manejo del equipo como en la distribución de las cargas, lo cual otorga al sistema una amplia capacidad de maniobra. Además, mejora las condiciones de mantenimiento, aumenta la eficacia del sistema y reduce los tiempos de recuperación ante una problemática de la celda. En lo referente a la escalabilidad, esta característica permite irse adecuando a los consumos de energía de la demanda a través de módulos de potencia, la cual va aumentando o disminuyendo según los requerimientos de la demanda. En general, un sistema modular de mili-CC ofrece mayor eficiencia con respecto a motores, baterías y otros generadores eléctricos ya que presentan: una operación silenciosa y bajo peso, lo cual implica una gran versatilidad para su instalación en diversos ambientes. En general, las mili- CC auto-respirables ofrecen las siguientes ventajas sobre otras fuentes de energía.

1. Los combustibles usados en celdas suelen tener mucha más densidad de energía que sus contrapartes de baterías (aproximadamente 10 veces mayor).
2. La capacidad inmediata de reponer la producción de energía (en lugar de cargar la batería por un tiempo prolongado), la CC funciona mientras se le suministre el combustible. Además, los componentes que la integran pueden ser sustituidos.
3. Las celdas de combustible son limpias y eficientes.
4. Para aumentar la densidad de potencia de una celda, solo es necesario aumentar la relación de superficie/volumen. Esto es mucho más simple que la ingeniería de nuevos materiales químicos. Por otra parte, el diseño de mili- CC auto-respirable ofrece los siguientes beneficios: la reacción electroquímica, transferencia de calor, así como la transferencia de masa, son todos fenómenos de superficie. Como es un dispositivo miniaturizado, la relación superficie/volumen se incrementa en todo el dispositivo porque, por lo general son escalas con l^2 mientras la escala del volumen son l^3 . La arquitectura en capas de una típica PEMFC se presenta a escala en un dispositivo miniaturizado. Se espera que una mili- CC auto-respirable incremente la superficie/volumen en términos de eficiencia electroquímica por área efectiva de superficie.

5. Incrementa la densidad de poder (debido a la alta relación superficie/volumen).
6. Bajo costo. Análisis técnicos y económicos han demostrado que las PEMFC tiene un mercado más accesible en dispositivos portátiles que para aplicaciones de transporte en un corto plazo, ya que un mayor costo por unidad de energía es aceptable a estas escalas más pequeñas.
7. Alta eficiencia (debido a la alta relación superficie/volumen y al correspondiente incremento de los límites de la triple fase).
8. Mejor uso del catalizador.
9. Novedosas aplicaciones a la celda de combustible.
10. Es más fácil mantener la relación en un entorno homogéneo dentro de un área pequeña.
11. Baja resistencia interna.
12. Los canales de flujo pequeños permiten el transporte eficiente de la masa.

Capítulo 2. Estado del arte

2.1. Tendencias de la investigación

Para abordar el estado del arte se seleccionaron seis temas relacionados con el hidrógeno y celdas de combustible. La búsqueda de dichos temas se realizó en ScienceDirect (www.sciencedirect.com), en septiembre de 2018, con artículos desde 1995 al presente. Búsqueda avanzada o “Advanced search” fue la herramienta utilizada en esta página como se muestra en la figura 2.1.



ScienceDirect Journals & Books

Advanced Search

All of the fields are optional.
Find out [more](#) about the new advanced search.

Find articles with these terms

In this journal or book title Year(s)

Author(s) Author affiliation

Title, abstract or keywords

Figura 2.1 Búsqueda avanzada en ScienceDirect.

Para la búsqueda avanzada se utilizaron palabras claves en el campo “*Find articles with these terms*” donde se realizó la búsqueda de los siguientes términos: Hydrogen (Hidrógeno), Fuel Cell (Celda de Combustible), Micro Fuel Cell (Micro Celdas de Combustible), Micro PEMFC (Micro Celda de Combustible de Intercambio Protónico), Portable Fuel Cell (Celda de Combustible Portátil) y Air Breathing Fuel Cell (Celda de Combustible Auto-Respirable). En la figura 2.2 se observa el motor de búsqueda avanzada de ScinceDirect, en esta opción se pueden buscar los artículos, revistas, papers ya sea por año, nombre de la publicación o filtrar por nombre del autor.

Advanced Search

All of the fields are optional.
Find out [more](#) about the new advanced search.

Find articles with these terms

In this journal or book title

Year(s)

Author(s)

Author affiliation

Title, abstract or keywords

Figura 2.2 Búsqueda con palabras claves en ScienceDirect.

En las figuras 2.3 a la 2.8 se muestra el número de artículos publicados en revistas importantes, en el periodo de 1995 al 2018 en los temas mencionados con anterioridad: Hidrógeno, Celda de Combustible, Micro Celdas de Combustible, Micro Celda de Combustible de Intercambio Protónico, Celda de Combustible Portátil y Celda de Combustible Auto-Respirable. En la figura 2.3 se observa que la revista Tetrahedron Letter cuenta con el mayor número de publicaciones debido a que esta revista proporciona una rápida diseminación de relatos breves de avances de gran importancia en avances de la química orgánica, materiales orgánicos y la química bioorgánica [15].

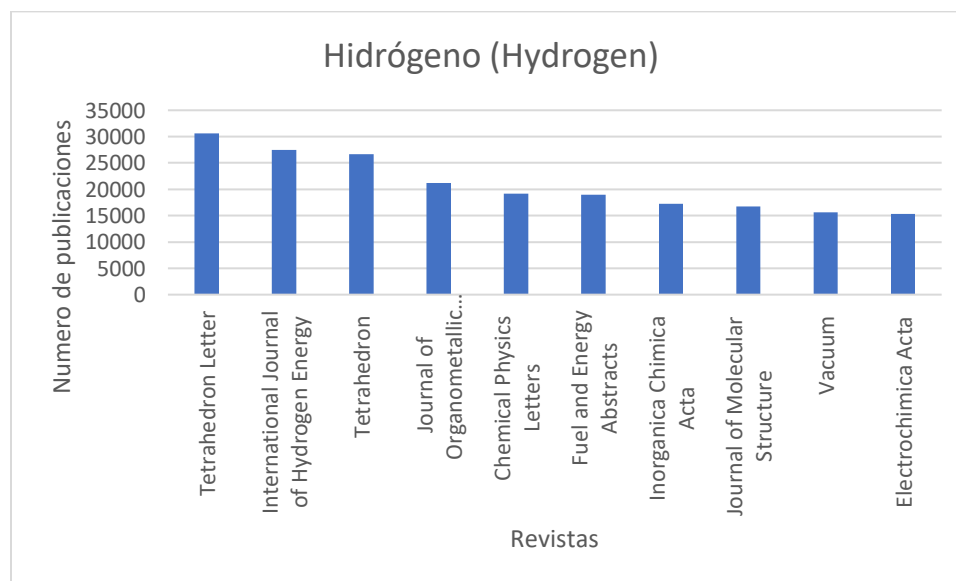


Figura 2.3 Cantidad de publicaciones por revista con respecto al tema Hidrógeno. (Elaboración propia con datos de ScinceDirect [16])

En la figura 2.4 se presenta la cantidad de artículos presentados respecto al tema Fuel Cells (Celdas de Combustible). Se puede apreciar que la revista International Journal of Hydrogen Energy registro un mayor número de publicaciones, debido a que esta revista

tiene como objetivo el intercambio y la nueva difusión de ideas, desarrollo tecnológico y resultado de investigación en el campo de la energía del hidrógeno [17].

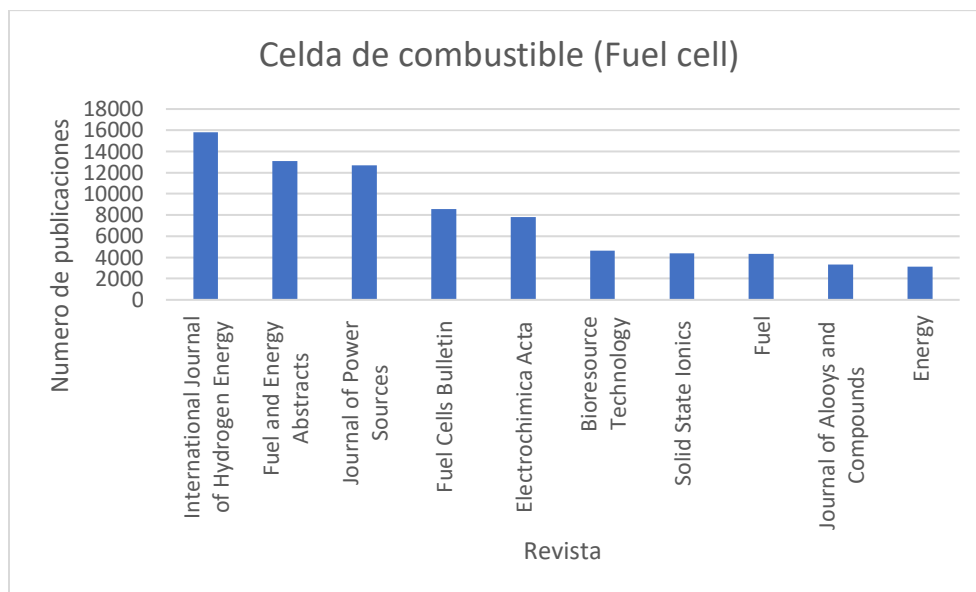


Figura 2.4 Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Celda de Combustible (Elaboración Propia con datos Scince Direct [16])

A continuación, en la figura 2.5 se presenta la cantidad de artículos referentes a Micro Celdas de combustible (Micro Fuel Cell). Se puede observar que nuevamente la revista International Journal of Hydrogen Energy *ISSN: 0360-3199*, esto debido a lo explicado anteriormente. Le siguen revistas como Journal of Power Sources *ISSN: 0378-7753* con más de 29000 artículos.

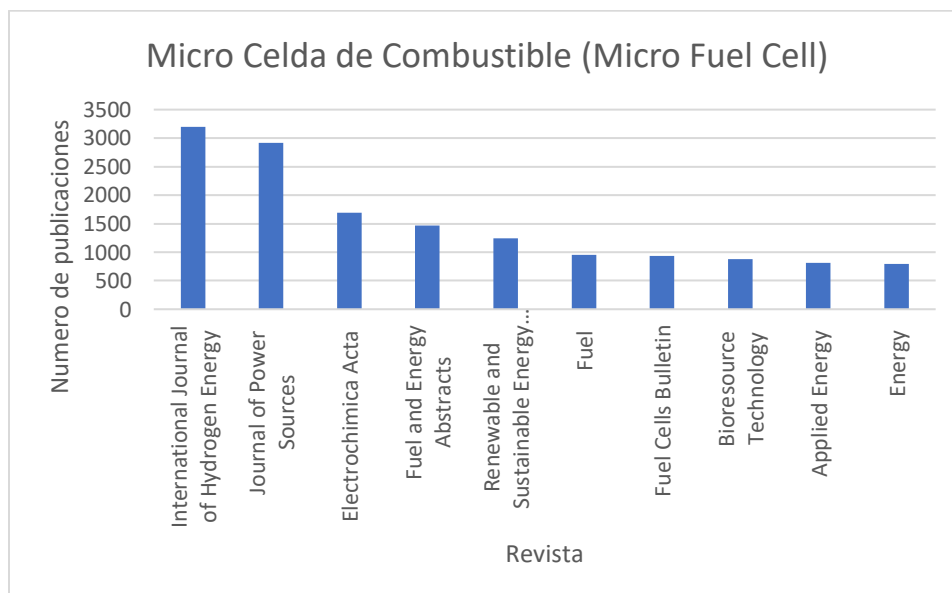


Figura 2.5 Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Micro Celda de Combustible (Elaboración Propia con datos Scince Direct [16]).

A continuación, en la figura 2.6 donde gráficamente se observa el recuento del tema Micro Celda de Combustible de Intercambio Protónico (Micro PEMFC) donde nuevamente la revista International Journal of Hydrogen Energy ISSN: 0360-3199 tiene el mayor número de publicaciones en este tema, con casi 900 artículos.

En comparación con las Micro Fuel cell cuentan con más de 30,000 publicaciones, es notable que existe menos publicaciones del estado del arte con las Micro PEMFC esto debido a que este campo no esta tan investigado como otros, pero los avances día a día son importantes.

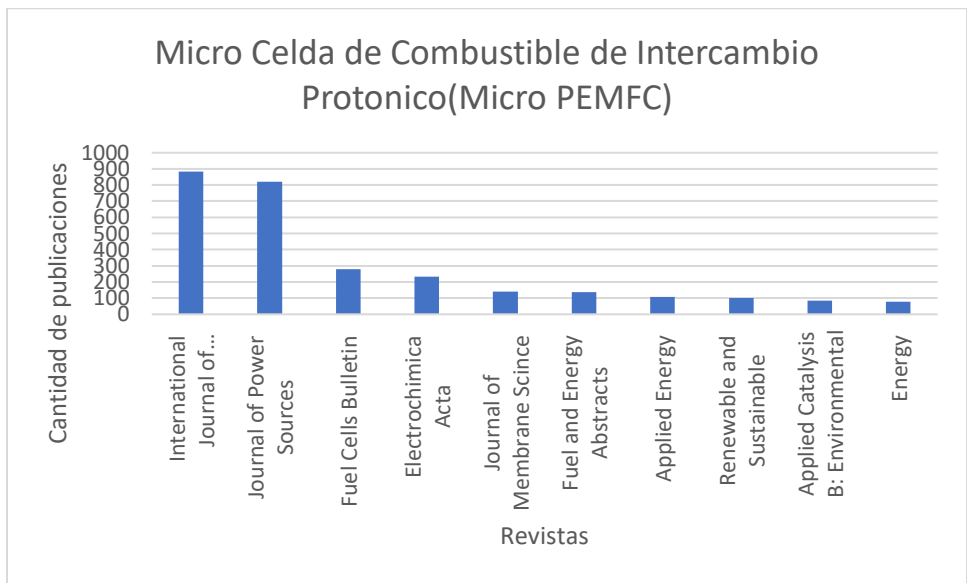


Figura 2.6 Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Micro Celda de Combustible de Intercambio Protónico (Micro PEMFC) (Elaboración Propia con datos Scince Direct [16]).

En la figura 2.7 se observa en el grafico la cantidad de publicaciones por revista del tema Celda de Combustible Portátil (Portable Fuel Cell), se aprecia que la revista Journal of Power Sources ISSN 0378-7753 cuenta con más de 2500 publicaciones, esto debido a que esta revista su objetivo es publicar acerca de celdas de combustible, super capacitores, celdas electroquímicas entre otras [18].

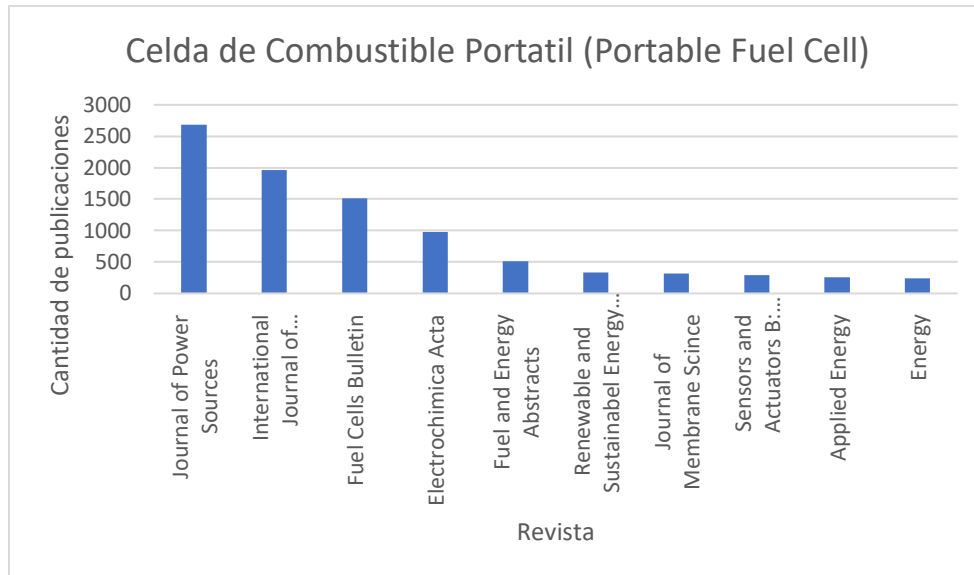


Figura 2.7 Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Celda de Combustible Portátil (Portable Fuel Cell) (Elaboración Propia con datos Scince Direct [16])

En el tema Celda de Combustible Auto Respirable (Air Breathing Fuel Cell), nuevamente la revista Journal of Power Sources ISSN 0378-7753 cuenta con el mayor número de publicaciones, con más de 450 publicaciones, esto debido a que su área de estudio mencionada con anterioridad [18].

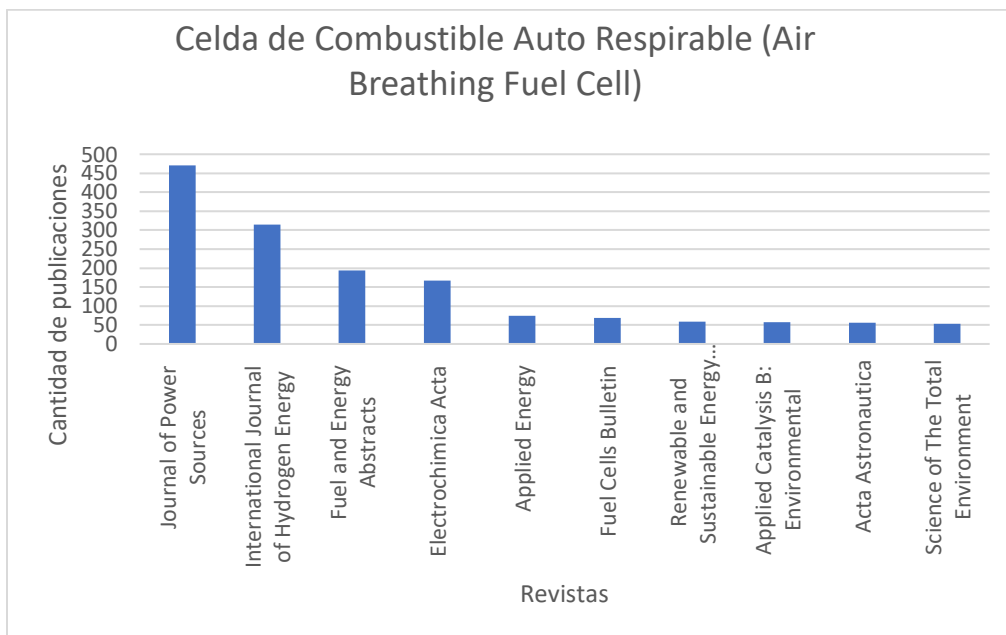


Figura 2.8 Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Celda de Combustible Auto Respirable (Air Breathing Fuel Cell) (Elaboración Propia con datos Scince Direct [16]).

En la figura 2.9, se muestra las gráficas que presenta la cantidad de publicaciones por año, empezando con el tema de Hidrógeno (Hydrogen) y terminando con Celda de combustible Auto Respirable (Air Breathing Fuel Cell), cabe mencionar que se partirá

desde el año 1995 hasta 2018. En la gráfica se puede apreciar que a partir de 1997 al 2017 el crecimiento de la investigación en este tema ha ido aumentando. En 2018 cuenta con más de 73000 publicaciones y se nota una disminución con respecto a 2017 con más de 76000 publicaciones, pero este cambio es debido a que el año en curso no ha finalizado, seguramente esta cifra incrementara.

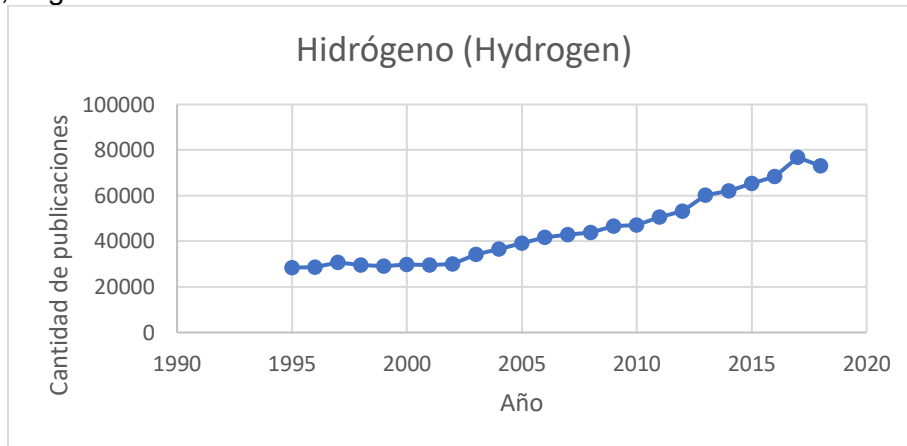


Figura 2.9 Cantidad de publicaciones por año en el tema Hidrógeno (Hydrogen) (Elaboración propia con datos Scince Direct [16])

En la figura 2.10, se muestra el número de artículos publicados del año 1995 a 2018 del tema Celda de Combustible (Fuel Cell), observando la tendencia del crecimiento de la investigación, del año 1995 a 1997 la publicación de artículos se incrementó, pero en 1998 la publicación disminuyó. Nuevamente en 1999 a 2000 las publicaciones aumentaron, pero un año más tarde en 2001 las publicaciones disminuyen. De 2002 a 2006 el número de publicaciones llega a más de 9500 publicaciones, pero en 2007 este número decrece. De 2008 hasta 2017 se ha mantenido esta tendencia creciente llegando a más de 25000 publicaciones, seguramente finalizando 2018 supere esta cantidad.

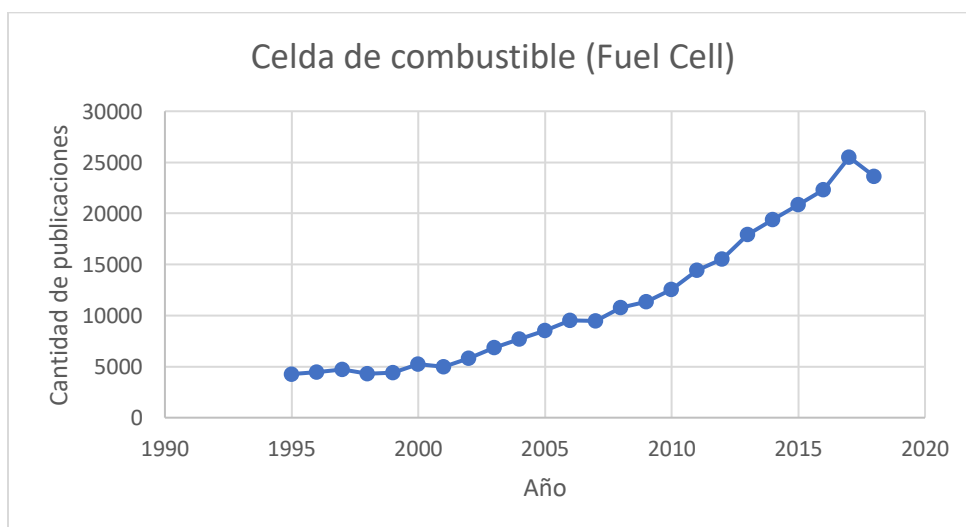


Figura 2.10 Cantidad de publicaciones por año en el tema Celda de Combustible (Fuel Cell) (Elaboración propia con datos Scince Direct [16])

A continuación, en la figura 2.11 se explica la tendencia de numero de publicaciones por año el tema Micro Celdas de Combustible (Micro Fuel Cell), en comparación con la gráfica

anterior de celdas de combustible se observa que el número de publicaciones por año es menor. En este tema de Micro Celdas de Combustible generalmente de los años 1999 a 2017 el número de publicaciones se ha comportado con una tendencia creciente.

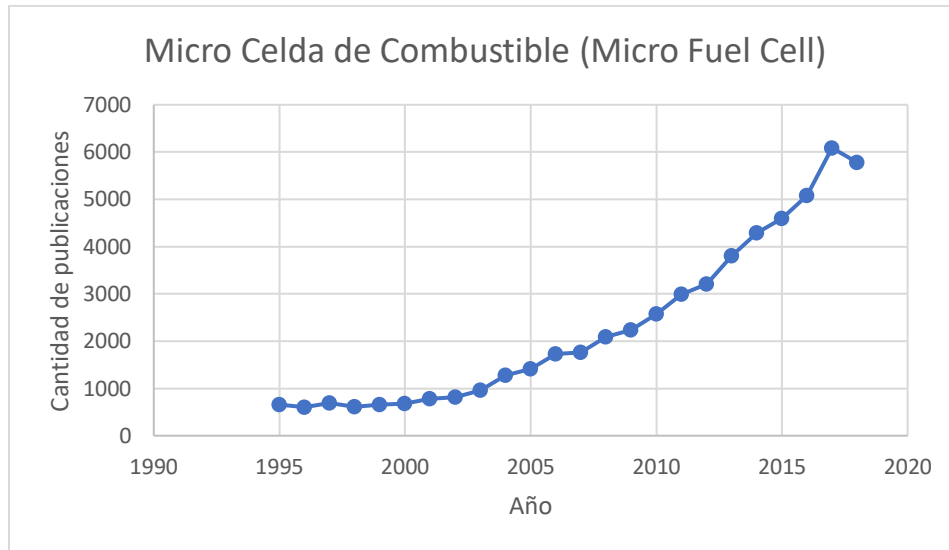


Figura 2.11 Cantidad de publicaciones por año en el tema Micro Celda de Combustible (Micro Fuel Cell) (Elaboración propia con datos Scince Direct [16])

En el tema de Celda de Combustible Portátil (Portable Fuel Cell) se muestra en la siguiente figura 2.12 el resultado de la investigación, una tendencia irregular desde el año 1995 con más de 100 publicaciones registradas hasta el 2009 donde comienza la importancia hacia este tema con más de 950 publicaciones. Hasta el momento se cuentan con más de 1700 publicaciones lo que indica un crecimiento importante hacia las Celdas de Combustible Portátiles. Se observa claramente que este tema presenta menor cantidad de publicaciones comparado con los temas Micro Celdas de Combustible y Celdas de Combustible.

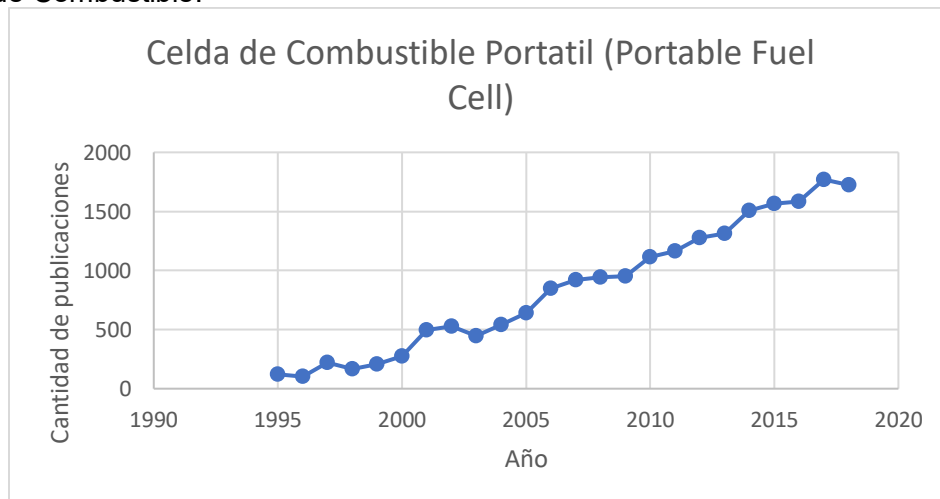


Figura 2.12 Cantidad de publicaciones por año en el tema Celda de Combustible Portátil (Portable Fuel Cell) (Elaboración propia con datos Scince Direct [16])

En el tema de Celda de Combustible Auto Respirable en la figura 2.13 se aprecia un aporte pobre en comparación a los temas anteriores, este comportamiento se encuentra

relacionado con el interés y la necesidad de investigación. Este tema tuvo un despegue importante en el año 2004, hasta 2017 había más de 500 publicaciones acerca de este tema.

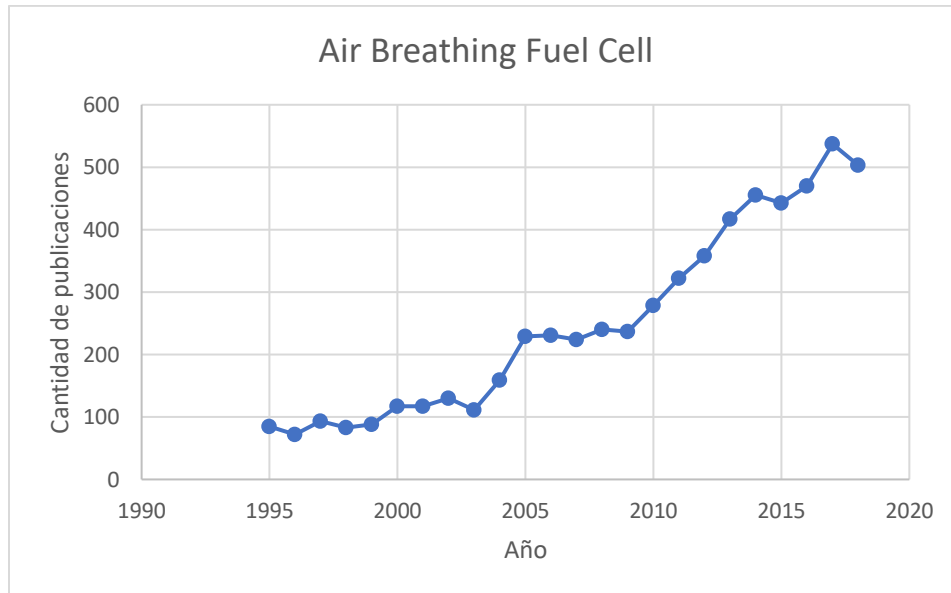


Figura 2.13 Cantidad de publicaciones por año en el tema Celda de Combustible Auto Respirable (Air Breathing Fuel Cell) (Elaboración propia con datos Science Direct [16])

En cuanto al análisis realizado por temas de investigación, fue posible identificar el mercado potencial de las mili-CC permitiendo identificar el desarrollo de este dispositivo como un área de oportunidad tecnológica. De esta forma, este proyecto propone la obtención de una celda de combustible de tamaño milimétrico (300 mW con una densidad de potencia alrededor de 110 W/Lt) que represente una opción viable de generación de energía para aplicaciones portátiles.

2.2 Apilamiento

Una monocelda funciona con tensión de salida de alrededor de 0.7 V y su eficiencia no mayor al 60%. Debido a que en muchas aplicaciones se necesitan tensiones mayores, este aumento se obtiene conectando en serie las celdas y formando un apilamiento denominado "Fuel Cell Stack". En un stack para minimizar un alto precio y peso del dispositivo, las CC se unen entre sí mediante placas bipolares, de manera que se utiliza solo una placa con doble canalización en cada una de las superficies activas.

El área de una celda puede variar mucho; una CC puede tener unas pocas celdas apiladas o cientos de ellas conectadas en serie mediante placas bipolares y para aplicaciones en las que se necesita gran potencia se pueden usar varios stacks combinados en serie o en paralelo.

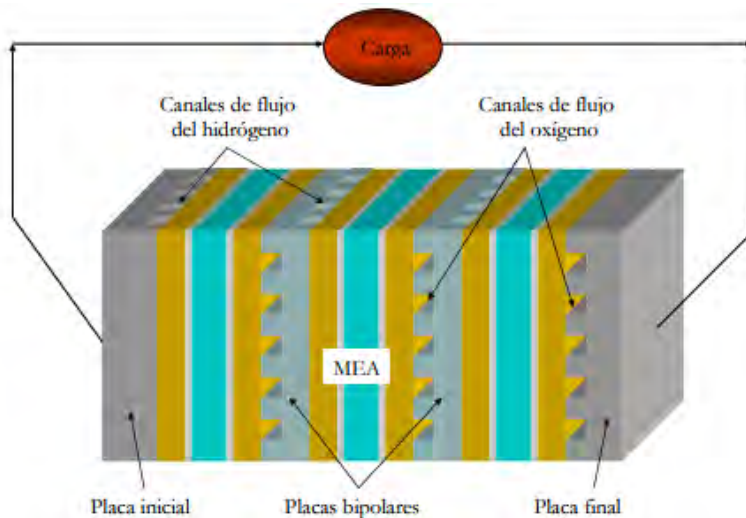


Figura 2.14 Unión de celdas de combustible mediante placas bipolares de doble canalización.

Aunque existen varios tipos de configuraciones, la más comúnmente utilizada en las PEMFC es la de las placas bipolares. Sin embargo, los materiales y métodos de fabricación usados difieren sólo ligeramente unos de otros. En esta configuración, una sola placa bipolar conductora está en contacto con el ánodo de una celda y el cátodo de la adyacente, dejando de este modo ambas celdas conectadas en serie. Además, esta configuración aporta pérdidas eléctricas mínimas al total del sistema.

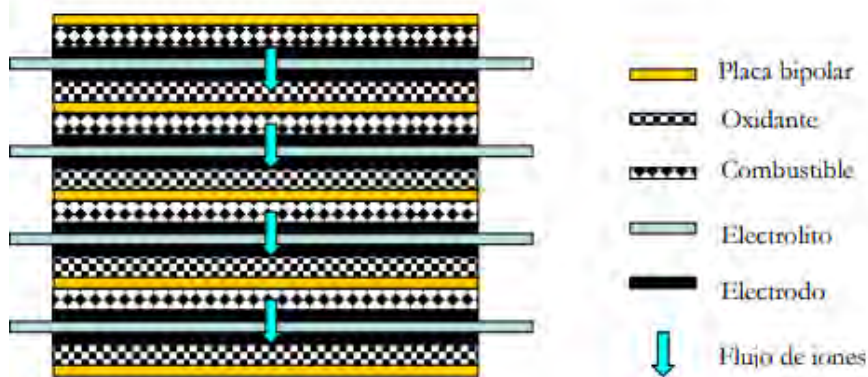


Figura 2.15 Interconexión vertical de celdas mediante la palca bipolar.

Un sistema alternativo al de la conexión vertical de celdas independientes, es el de la conexión lateral, figura 2.16 Mientras que la conexión vertical es adecuada para sistemas que demandan gran cantidad de potencia, la conexión lateral (también llamada horizontal), es más apropiada para aplicaciones portátiles tales como ordenadores portátiles, PDA's a teléfonos móviles.



Figura 2.16 Interconexión lateral.

2.3 Dimensionamiento del apilamiento

Para el diseño de un stack de celdas de combustible se tiene que tener en cuenta varios factores como lo son la potencia máxima a la salida, potencial de la celda y corriente de esta. Cada diseño va a depender de la aplicación, pero los requerimientos de potencia, potencial y corriente se calculan en base a las ecuaciones elementales de electricidad. Por ejemplo, en la ecuación 2 la potencia es directamente proporcional al potencial del apilamiento y la corriente que lo atraviesa.

$$W_{PC} = V_{Apl} \cdot I \quad (2)$$

Pero comúnmente hablando de celdas de combustible, se utiliza el termino de densidad de corriente, en lugar de corriente.

$$I = i \cdot A_{Cell} \quad (3)$$

Donde: i es la densidad de corriente (A/cm^2), A_{Cell} es el área de la celda (cm^2). Por otra parte, el potencial de cada celda y la densidad de corriente están relacionadas mediante la curva de polarización de la celda de combustible.

$$V_{Cell} = f(i) \quad (4)$$

La curva de polarización se obtiene de forma experimental y es única para cada celda, pero sucede que los fabricantes usan una curva modelo de las mismas características para cada dispositivo, la cual contiene datos que se acercan al comportamiento de cada celda por separado.

Para diseñar una celda de combustibles es necesario determinar la densidad de potencia que tiene que ser capaz de generar el sistema, en condiciones de máxima carga, sin generar inconvenientes. Si se diseñara una celda para alguna aplicación portátil, la densidad de potencia por cm^2 tiene que ser elevado y la eficiencia deber ser máxima. Una densidad de potencia alta surge en menores tensiones y por lo tanto el apilamiento es más barato [19].

El número de celdas en un stack se determina basándose en el potencial máximo requerido. El potencial total es la suma del aporte de cada una de las celdas:

$$V_{Apl} = \sum_{i=1}^{N_{Cell}} V_i = V_{Cell} \cdot N_{Cell} \quad (5)$$

Donde V_{ApI} es el potencial del apilamiento, V_{Cell} es el potencial de cada celda y N_{cell} es el número total de celdas.

Cada celda de combustible debe tener un área determinada previamente, para poder así contar con la corriente final del stack. Estos apilamientos de celdas de combustible se relacionan con el hecho de tener varias celdas interconectadas en serie y en paralelo; se conectan en serie para obtener mayor tensión, en paralelo para lograr una corriente de salida mayor. A continuación, en la tabla 2.1 se presentan algunas potencias de dispositivos comunes.

Tabla 2.1. Potencia para algunos dispositivos comunes [20].

Aplicación	Potencia Máx. (w)	Tensión (v)	Potencia Med. (w)
Teléfono móvil	1.2 a 3	1.2 a 4.2	1.7
Laptop	80	8 a 12.6	15
Dron	50-100	15.2	18-65
Motocicleta eléctrica	5900 a 7700	38 a 51	1200
Automóvil	120000	255 a 284	50000 a 85000
Generador de emergencia	5000	24 a 30	1260
Generación Estacionaria	10000 a 50000	12 a 480	5000

2.4 Técnicas de caracterización

Debido a la existencia de las pérdidas durante el proceso electroquímico en una celda de combustible existen diversas técnicas de caracterización para identificar, comprender y analizar los fenómenos de irreversibilidad. Las técnicas se dividen en estacionarias o dinámicas.

2.4.1 Curvas de polarización

Las curvas de polarización describen el comportamiento de la celda en régimen estacionario. Es decir, cuando la demanda de corriente que realiza una carga externa permanece constante a lo largo del tiempo. La curva se obtiene mediante la técnica de voltamperometría. La curva representa el comportamiento real de la celda debido a la presencia de diferentes pérdidas como son: resistencias óhmicas; pérdidas por activación; pérdidas por concentración.

2.4.2 Cronoamperometría

En cronoamperometría la celda se somete a un cambio de potencial y se registra la respuesta transitoria de la corriente producida por la celda. Se observa y registra la corriente, también, la resistencia óhmica y la potencia. Este estudio permite conocer el comportamiento de la celda en condiciones de operación a diferentes voltajes para prevenir fallas y analizar la estabilidad electroquímica de la celda.

Capítulo 3. Diseño de la mili-PEMFC

3.1. Definición del diseño

Este prototipo está basado en las características convencionales de las celdas de combustible, con el propósito de portabilidad se realizó un cambio en la utilización de los materiales y configuración interna de la celda, esto con el fin de obtener una mili-CC compacta y de menor peso. Los modelos de la celda fueron ejecutados para una mejor visualización en software CAD (SolidWorks 2018). A continuación, se presentan las modificaciones realizadas respecto a una celda de combustible convencional.

- A. **Placa bipolar o conexión bipolar (BP):** por lo general en una celda convencional, las BP son manufacturadas a partir de compuestos a base de grafito. En este diseño la placa de grafito es sustituida por una capa de polímero (Mylar) como soporte mecánico y separador de gases, y una malla de (Ti) que permite la conexión eléctrica en serie entre celdas. El uso de este polímero es prometedor en las mili-CC debido a su baja densidad, mínima permeabilidad en los gases, alta conductividad térmica y fácil manejo.
- B. **Canal de flujo:** en este diseño se considera solo un canal de flujo en forma recta para el hidrogeno en el ánodo. Esto permite un transporte eficiente y directo de combustible. El canal de flujo se utilizó polímero GORE-TEX GR®.

3.2. Materiales utilizados

Los materiales se seleccionaron con el objetivo de realizar una celda de combustible pequeña y ligera para su uso portátil. La membrana de intercambio protónico considerada en este trabajo fue la NR212 con un espesor de 0.05 mm de la marca Dupont. La capa catalítica fue de 100% Pt fabricada con las condiciones establecidas en el CNR-ITAE. Con el nuevo diseño sin placas de grafito, se eligió una capa de polímero (Mylar) de 0.19 mm de grosor cuya principal función es separar los gases y proporcionar soporte para la conexión bipolar. Mallas de aleación de titanio con platino de espesor 0.27 mm se utilizaron como conductores eléctricos de la celda. Para el canal de flujo se utilizó polímero GORE-TEX GR®, se le añadió un canal de flujo en la parte central. Como capas difusoras de gas se utilizaron difusores con capa microporosa de la marca Ce-Tech W1S1005 de 0.41 mm de espesor, para esto el diseño del ánodo y cátodo fueron diferentes. Para los sellos se utilizaron distintos materiales, en el caso del ánodo se utilizó un sello periférico de (Mylar) y en el cátodo GORE-TEX GR®. Para mejorar el desempeño del flujo de aire en la parte del cátodo se empleó una placa de (Mylar) de 0.19 mm de espesor con diseño de canales. En la tabla 3.1 se especifican los materiales utilizados en el diseño y construcción de la celda. Así mismo en esta tabla se mencionan la función de cada uno de los componentes que integran la mili-CC.

Tabla 3.1 Lista de materiales que conforman los componentes de la celda.

Material	Componente	Características	Función
Membrana NR212 con capa catalítica	CCM (Membrana con capa catalítica)	Capa catalítica con 100% Pt Black, espesor de la membrana 0.05mm. Área efectiva de 104x20mm.	Trasporte de protones del ánodo al cátodo. Separación del combustible y el oxidante.
Tereftalato de polietileno	Mylar BP	Espesor:0.19mm Diseño BP: 104x20mm	Soporte mecánico de la celda. Separación entre celdas.
GORE-TEX GR®.	Canal de flujo	Espesor:0.5mm 104x20mm	Canal de flujo para el hidrógeno.
Ce-Tech W1S1005	GLD-Ánodo	Capa difusora de gases, micro porosa de 0.41mm de espesor con capa catalítica 76x14mm.	Difusión de los gases.
	GLD-Cátodo	Capa difusora de gases, micro porosa de 0.41mm de espesor con capa catalítica 62x20mm.	Conductividad eléctrica.
Tereftalato de polietileno	Sello periférico Ánodo	Espesor de 0.19 mm	Impide fugas en el ánodo. Soporte mecánico a la celda. Parte de BP.
GORE-TEX GR®.	Sellos cátodo	Espesor de 0.5 mm. Se comprime	Impide fugas de gases.
Malla Ti	Malla de Ti	Dimensiones para ánodo y cátodo: 106x16m	Conexión bipolar entre celdas Colector de corriente en la celda.

3.3. Manufactura de componentes

Los componentes de la mili-CC fueron diseñados en SolidWorks 2018, cada componente fue elaborado por separado y ensamblado en orden manualmente.

Existen varios métodos de deposición de tinta catalítica en la MEA, con la mínima cantidad de platino se busca alcanzar un alto desempeño, siendo este un material muy costoso y noble. A continuación, se describen los principales métodos para la deposición de tinta catalítica.

- 1) Electro spray. Consiste en la pulverización de una muestra líquida o suspensión bajo la influencia de un campo eléctrico fuerte, el campo eléctrico entre la aguja inyectora y el sustrato forma una niebla de partículas ionizadas que se depositan homogéneamente [21].
- 2) Serigrafía. La tinta se vierte cerca de un racero, la cual se extiende a lo largo de una malla de serigrafía y luego se empuja a través de la malla hacia la capa de un sustrato, moviendo el racero rápidamente [22].

- 3) Electrodeposición. Por medio de una corriente continua se hace precipitar a un metal, hacia el electrodo [23].
- 4) Decal. En este proceso la tinta catalítica se deposita sobre un sustrato generalmente de teflón y se transfiere a la membrana con ayuda de presión y temperatura [24].

En el transcurso de la manufactura de la mili-PEMFC, es importante mencionar los retos en este proceso. El reto principal que se presentó en el ensamblado de la mili-celda fue el encapsulamiento del ánodo para evitar fugas. Cabe mencionar que un posicionamiento erróneo del acomodo de la membrana o el sello periférico de la celda provoca fuga de hidrógeno las cuales limitan el rendimiento de la celda.

Para el proceso de ensamblado de la mili-celda se optaron por varias alternativas entre las cuales se encuentran:

- 1) El uso de materiales auxiliares.
- 2) Diseño y construcción de mesa de ensambles.
- 3) Diseño de sello periférico con Mylar.
- 4) Encapsulamiento del ánodo.
- 5) Uso de malla de Titanio como colectores de corriente.

Para iniciar con este proyecto se diseñó y construyó una mesa de ensamble para facilitar la construcción de la mili-CC. La mesa de ensamble está conformada por dos postes metálicos en su interior con una distancia adecuada para servir de guía para el ensamble de la mili-CC. En cuanto a la mesa, se trata de una pieza rectangular hecha de material PC-ABS que cuenta con las dimensiones de la celda que facilita la introducción en los postes metálicos. El objetivo principal de la mesa es facilitar el manejo de los componentes y que estos mismo no se muevan al ensamblado. En la figura 3.1 se muestra el diseño en SolidWorks® 2018 y la mesa ya manufacturada con los postes metálicos.

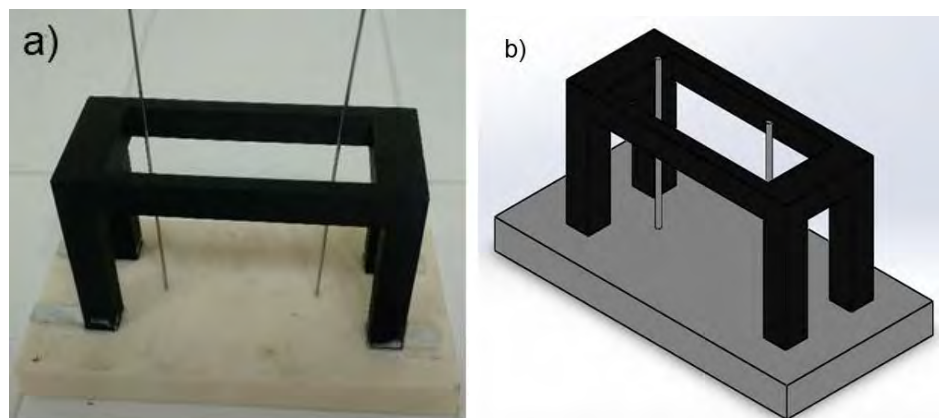


Figura 3.1 a) Mesa de ensamble manufacturada, b) Diseño en SolidWorks® 2018.

3.3.1. Manufactura de la Membrana con capa catalítica (CCM)

Para la manufactura de la membrana con capa catalítica, se utilizó el tipo NR212 DuPont® con 0.05mm de espesor. La tinta catalítica consiste en un catalizador de platino oscuro (100% Pt), solución de agua de carbonato de amonio y solución de 5% de

Nafion®, se mezclaron 30 minutos utilizando un agitador ultrasónico, para posteriormente atomizar la mezcla sobre la membrana. Una vez aplicada la tinta catalítica sobre la membrana, esta fue tratada térmicamente a 70°C en un horno por una hora, repitiendo el mismo proceso por ambos lados [9]. En la figura 3.2 se observa la vista de la membrana con la tinta catalítica ya depositada.



Figura 3.2 Membrana con capa catalítica.

3.3.2. Manufactura electrodos

Para manufacturar los electrodos lo primero que se realizó fue la tinta catalítica, de acuerdo al área efectiva de los electrodos y la carga de platino requerida por cm^2 . Se calculó la cantidad de catalizador, conductor iónico y solventes requeridos. Como catalizador se optó por Pt/C al 20% de la marca Electrochem, como conductor iónico se utilizó solución de Nafion® al 5% y como solventes agua desionizada y 2-propanol en una relación 1-1. La tela de carbón utilizada fue de la marca Ce-Tech W1S1005 con un espesor de 0.41 mm, esta se empleó tanto para el ánodo y cátodo. Esta tela se cortó en áreas especificadas en diferentes tamaños para el ánodo y cátodo los cuales se pesaron por separado en una báscula de precisión. Una vez registrado los pesos de la tela, se colocó el electrodo en una malla de serigrafía comercial de 90 hilos/cm, luego se depositó 5.3 mg de tinta catalítica a los dos costados opuestos de la abertura de la malla, figura 3.3. Posteriormente con ayuda de un racero se distribuyó la tinta a través de la malla de manera uniforme sobre la superficie del electrodo por movimientos de vaivén. Una vez terminada esta operación se retiró el substrato de la malla y se llevó el electrodo a un horno precalentado a 100°C durante 30 minutos. A la salida del horno nuevamente se registró el peso y se verificó si tenía la carga de platino requerida.



Figura 3.3 Racero y tabla para metodo serigrafia.

3.3.3. Manufactura de sellos

En el ánodo se utilizó Tereftalato de polietileno "Mylar". El tereftalato de polietileno o mejor conocido como Mylar fue la opción más factible debido a que ayuda al encapsulamiento del ánodo, este material cuenta con 0.19 mm de espesor, brinda soporte mecánico a la celda, es ligero, permeabilidad a los gases reactantes y reciclable.

Para el sellado del cátodo se utilizó principalmente el polímero GORE -TEX® PTFE con un espesor de 0.5 mm, ya que este material es flexible, presenta alta resistencia térmica, química y mecánica. Por su fácil uso este material se decidió usar para el sellado del cátodo. La figura 3.4 presenta una foto del material y su posición en la celda ensamblada.



Figura 3.4 Sellos de polímero GORE -TEX® en celda de combustible.

3.3.4. Ensamblado directo por capas

Después de fabricar todos los componentes que conforman la celda de combustible de la mili-CC, se ensamblaron dos prototipos utilizando el mismo procedimiento para ambos. Esta acción se realiza para evitar el uso de una prensa y que la membrana sea cortada por el colector de corriente. Con este método de ensamble se utilizó la mesa de trabajo de la figura 3.3, con ayuda de las guías metálicas se ensamblaron los dos prototipos de la mili-CC. En los dos prototipos las mili-CC fueron ensambladas con presión suministrada por tornillos, buscando una presión óptima para el contacto entre las capas de la celda y que no existan fugas. Para lo anterior, se aplicó un torque de 6 lb-in en los tornillos, cantidad suficiente para evitar fugas, proporcionar un mejor contacto entre las capas y no ocasionar daño en los componentes.

3.4. Descripción de los prototipos

En este apartado se describen los dos prototipos ensamblados con características, imágenes y resultados en las diferentes configuraciones. Los diseños de la mili-CC son presentados en orden.

Para la Celda 1 se utilizó elastómero SILASTIC® J como sello prefabricado con cables de Pt embebidos, por lo tanto, se tuvo que diseñar un molde para dicho sello. Este primer prototipo presenta la siguiente configuración: Mylar final, Mylar canal de flujo, Difusor de gas con capa catalítica, sello elastómero con alambres de Pt embebidos, MEA, cables de Pt, Difusor de gas con capa catalítica, placa de Mylar con canales, sellos Cátodo Mylar y

Mylar final. Para facilitar el manejo de los alambres de Pt y agilizar el ensamblado de la celda, se encapsulo el ánodo. Esto consiste en ensamblar las partes que conforman dicho lado: sellos, canal de flujo, sello con alambres de Pt, hasta la membrana, al final se colocó una capa de Mylar final la cual fue utilizada como soporte mecánico. Todos los componentes se cerraron con placas y se ejerció presión.

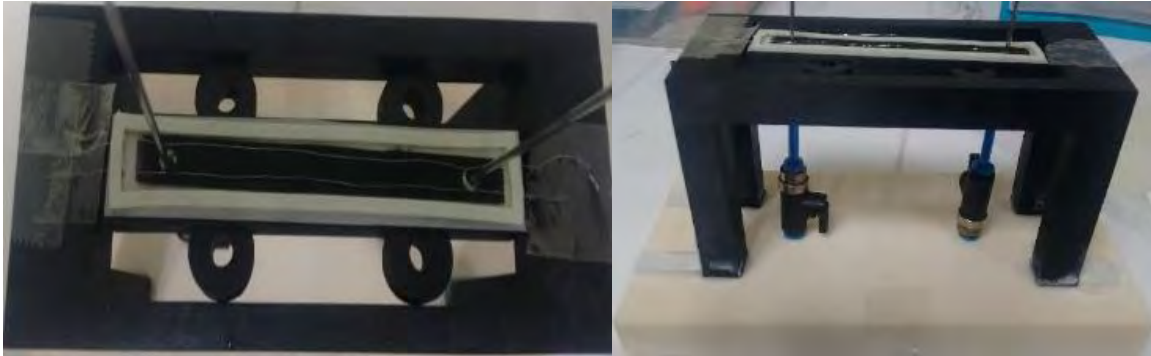


Figura 3.5 Ensamble de sellos con alambres de platino de la celda 1.

En la figura 3.5 se observa el ensamble de los sellos con los alambres de platino. En el prototipo de la Celda 1 se realizaron mediciones de continuidad y resistencia entre los cables para verificar la viabilidad del ensamble. Se encontró que no hubo continuidad y se procedió a realizar pruebas de fugas. En esta prueba, se presentaron muchas fugas por el lado del sello de silicón con cables de Pt. La presión de entrada indicada en la estación de pruebas descendió rápidamente, sugiriendo fugas en la celda. Debido a las fugas, la prueba electroquímica no fue realizada y se decidió hacer otro prototipo o método de ensamblaje. En resumen, este diseño no brindó suficiente soporte para el encapsulado del ánodo por lo cual se modificó el diseño para construir una Celda 2.

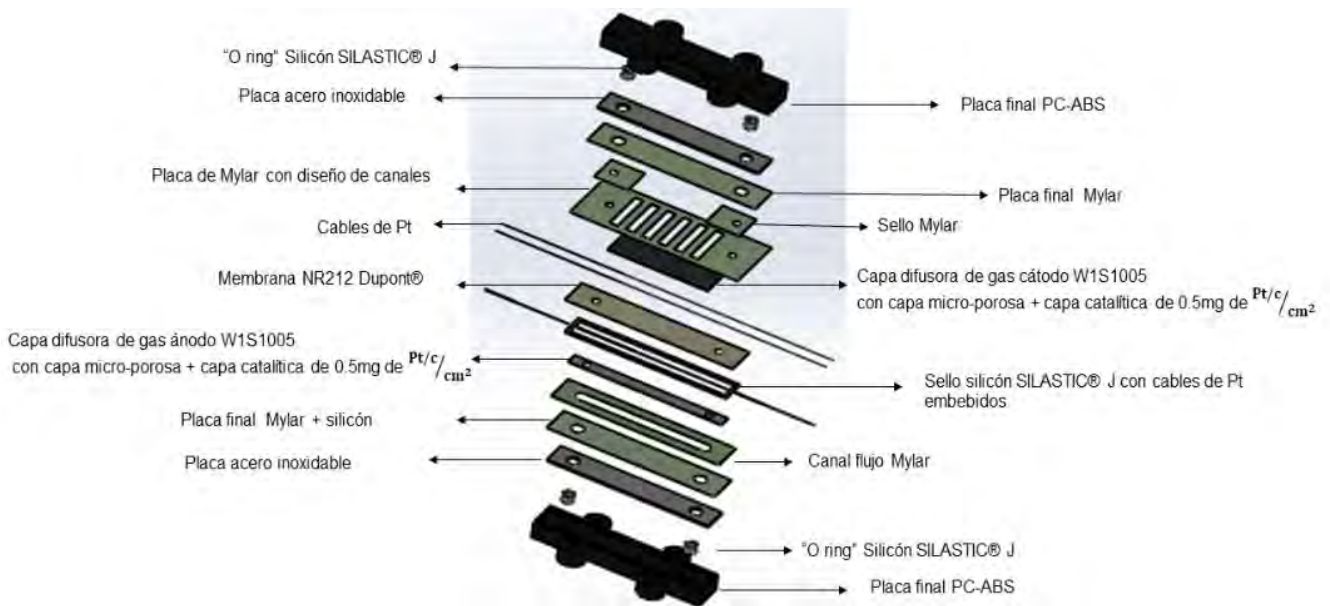


Figura 3.6 Celda 1 con vista explosionada en SolidWorks.

En la Celda 2 se modificaron varios componentes, entre los cuales el canal de flujo se hizo de GORE -TEX® PTFE, el sello de elastómero se cambió por un sello periférico

hecho de Mylar, como colectores de corriente se utilizaron mallas de Ti, y la MEA utilizada contaba con capa catalítica, por último, se añadieron sellos de GORE -TEX® PTFE en la parte del cátodo. En este caso se utilizó el mismo método de ensamblaje que la Celda 1. En la imagen 3.7 se presenta la Celda número 2 en una vista explosionada en SolidWorks.

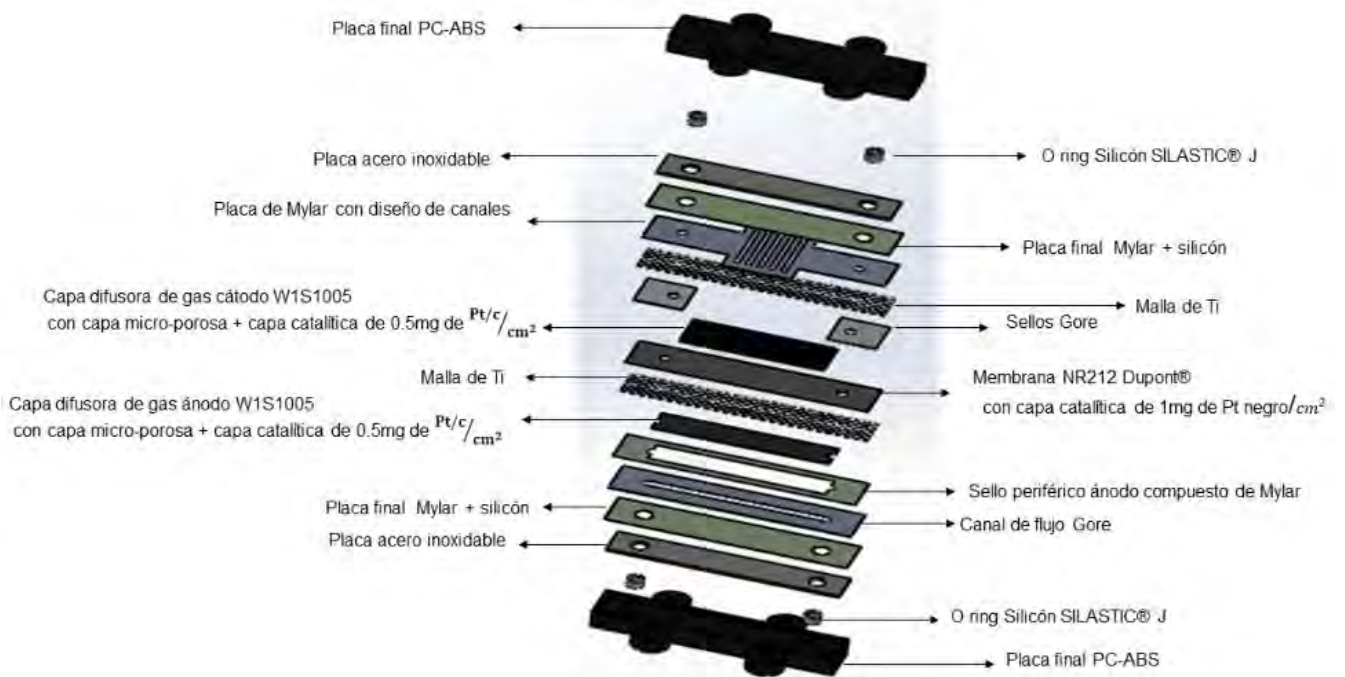


Figura 3.7. Celda 2 en vista explosionada con SolidWorks.

Con la sustitución de los cables de platino por mallas de titanio se mejoró el contacto entre el colector de corriente, difusores de gas y membrana. Además, estos nuevos colectores no ocasionaron esfuerzos cortantes entre los cables de platino y la membrana como en la celda 1. Este nuevo diseño permitió reducir el crossover ya que el encapsulamiento del ánodo se logró con los nuevos sellos periféricos. Debido a estas mejores características de diseño, este modelo se eligió para realizar el stack ya que su ensamblado por capas es más práctico que el prototipo anterior por su complejidad al usar cables de platino como colectores de corriente.

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del prototipo final, Celda 2. Estos resultados consisten en las curvas de polarización. Los estudios consistieron en comparar la respuesta de la celda con distintos flujos máscicos para la transferencia de aire en el ánodo.

4.1. Respuesta eléctrica de la celda construida

La figura 4.1 muestra las curvas de polarización con operación de cátodo a convección natural (sin ventilador), variación de flujo de hidrógeno en el ánodo con humedad relativa al 100%. Se puede apreciar que por lo general las cuatro curvas de polarización parten de 0.7 V. La curva amarilla con 30 mL/min de flujo de hidrógeno tiene la mayor corriente máxima con alrededor de 400 mA, lo contrario a la curva naranja que parte de mayor potencial con 0.75 V y con una corriente máxima de 325 mA. Se puede apreciar en la figura 4.1 que las 4 curvas presentan, desde circuito abierto (0 mA) el proceso de activación electroquímica, causado por la cinética de la reducción del oxígeno en el cátodo y posible crossover de hidrógeno. El siguiente descenso en las curvas corresponde a las pérdidas óhmicas causado por el flujo de iones a través de la membrana, flujo de electrones a través de los electrodos, campos de flujos y colectores de corriente. El ultimo descenso es debido a la perdida difusiva causado por el transporte de masa de los reactantes, en este caso de canales milimétricos, ambos gases tienen gran significancia.

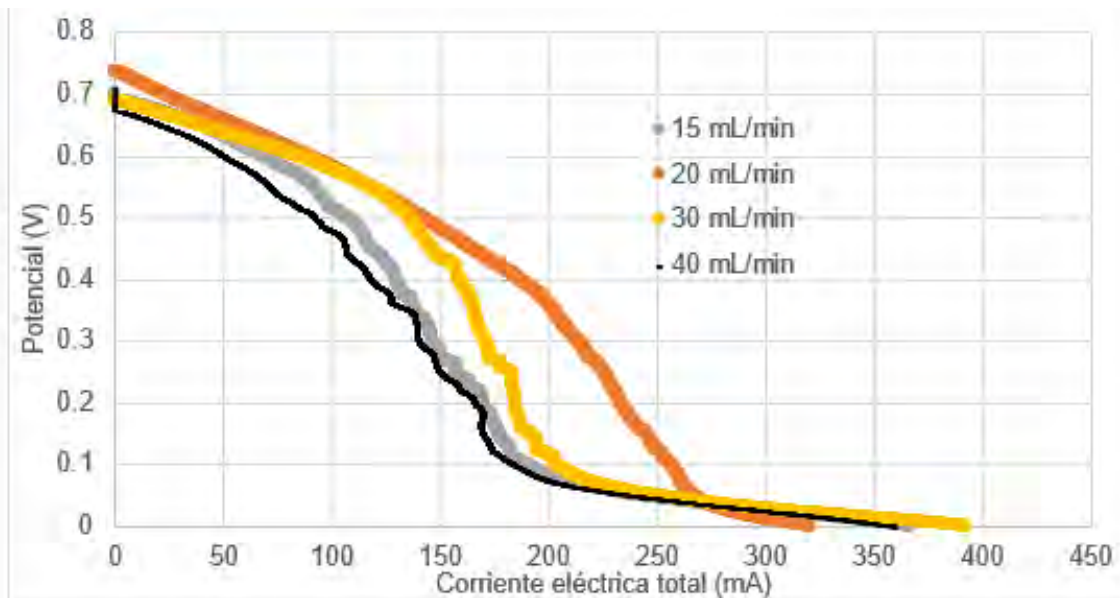


Figura 4.1 Curvas de polarización a convección natural con variación de flujo y humedad relativa al 100%

La figura 4.2 muestra las curvas de potencia de la celda, respectivas a la polarización de la figura 4.1. La curva de color gris presenta la velocidad de 15 mL/min, la naranja de 20

mL/min, la de color amarillo de 30 mL/min y el color negro de 40 mL/min. Se puede apreciar gráficamente que la curva de potencia mayor pertenece a la curva naranja con un flujo de 20 mL/min, esta curva de polarización cuenta con una potencia máxima de 74 mW a comparación de la amarilla con flujo de 30 mL/min que presenta la mayor corriente con alrededor de 400 mA, pero con potencia máxima de 69 mW, en este claro ejemplo de comparación de ambas graficas se aprecia que no siempre la curva de polarización que presente mayor corriente tendrá mejor potencia.

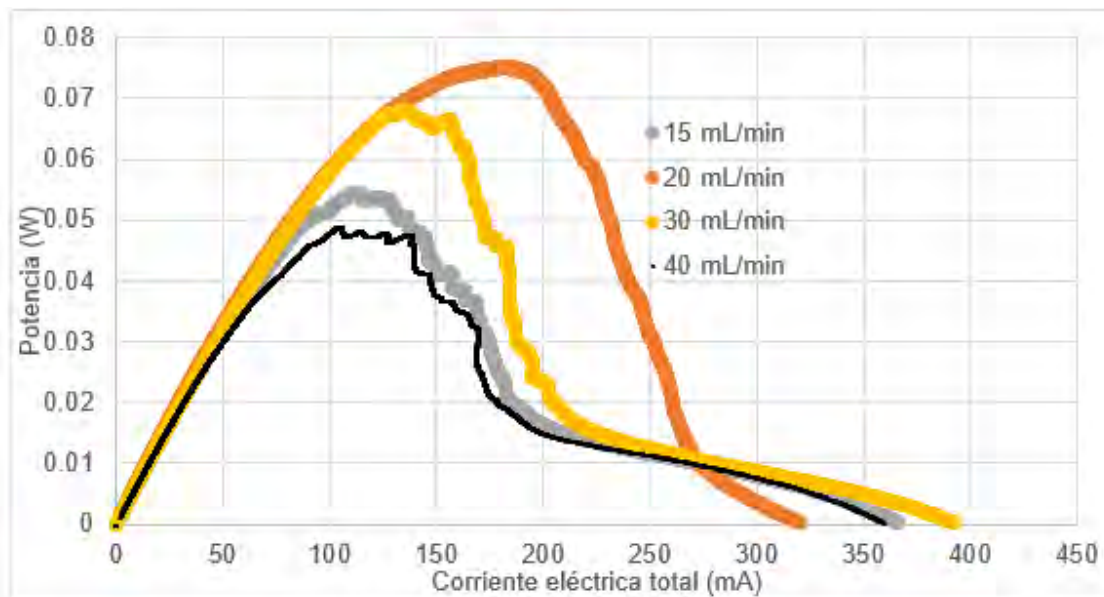


Figura 4.2 Curvas de potencia respectivas a curvas de polarización con variación de flujos.

La estequiometría a 15 mL/min es de 5.0; a 20 mL/min la estequiometría es de 6.7; a 30 mL/min es de 10.1 y a 40 mL/min la estequiometría es de 13.5. Se observa que la potencia máxima de la celda aumenta drásticamente al pasar al flujo de 20 mL/min desde el de 15 mL/min. Sin embargo, la potencia máxima disminuye al seguir aumentando el flujo a 30 y 40 mL/min. Observando las variaciones de la potencia y regresando a las curvas de polarización de la figura 4.1, se puede ver que se afecta la zona de difusión de masa y zona de resistencia óhmica, estos fenómenos son atribuidos a un exceso de flujo de fluido en un sentido perpendicular al transporte del electrodo (sobre la superficie del difusor).

La figura 4.3 muestra las curvas de polarización de la celda con variación de flujo en el cátodo. En esta figura, el flujo del ánodo es constante a 20 mL/min (mejor comportamiento de las curvas anteriores), con gas hidrógeno a 5 PSI y humedad relativa a 100%.

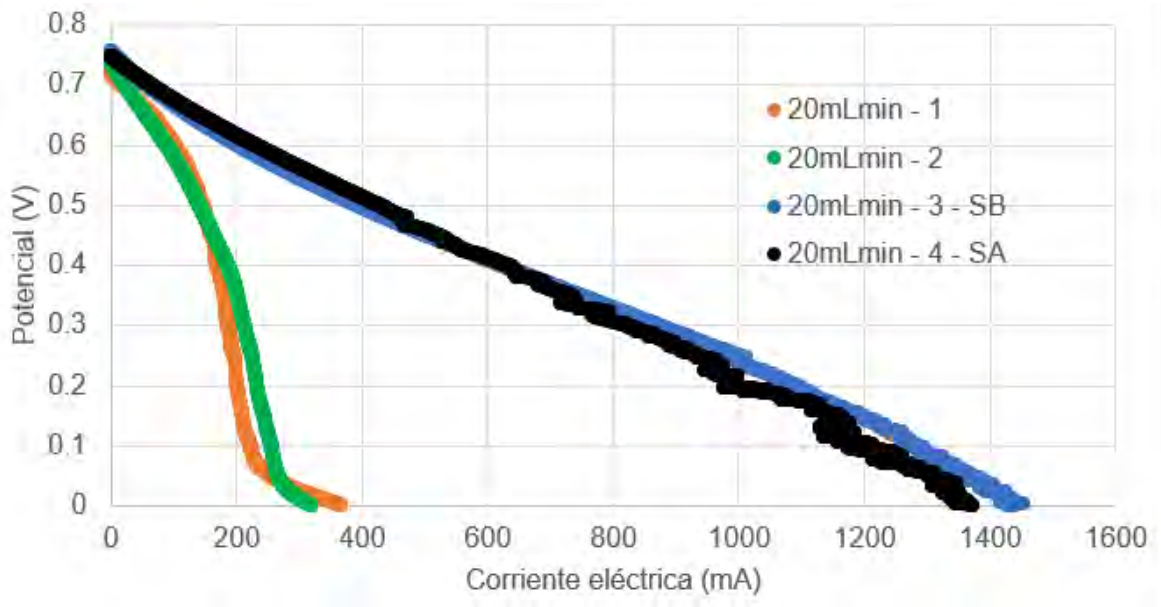


Figura 4.3 Curvas de polarización con variación de flujo en el cátodo.

Las curvas de color naranja y verde presentan el desempeño de la celda con flujo por convección natural en el cátodo (sin ventilador), la diferencia entre ellas es en la posición en el tiempo del protocolo de caracterización, la curva naranja fue adquirida al inicio de la sesión y la verde al final de todas las caracterizaciones. En la comparación de estas dos se observa que el desempeño de la celda se mantiene muy similar en el tiempo. En la figura 4.3, las curvas de color negro y azul presentan el desempeño de la celda con operación de cátodo con convección forzada (con ventilador). La diferencia entre las curvas negra y azul, es que la de color azul es con operación del ventilador a la velocidad baja y la negra con operación del ventilador a operación alta. Como se puede observar en las curvas de convección forzada y convección natural, el ventilador promueve mayor movimiento de moléculas de oxígeno en el lado del cátodo, por lo cual, al comparar las curvas azul y negra con la naranja y verde, en las primeras se aprecia que hay menor resistencia óhmica, pero sobre todo mucho mejor transporte de masa.

La figura 4.4 presenta las curvas de potencia de la celda, correspondientes a las curvas de polarización de la figura 4.3.

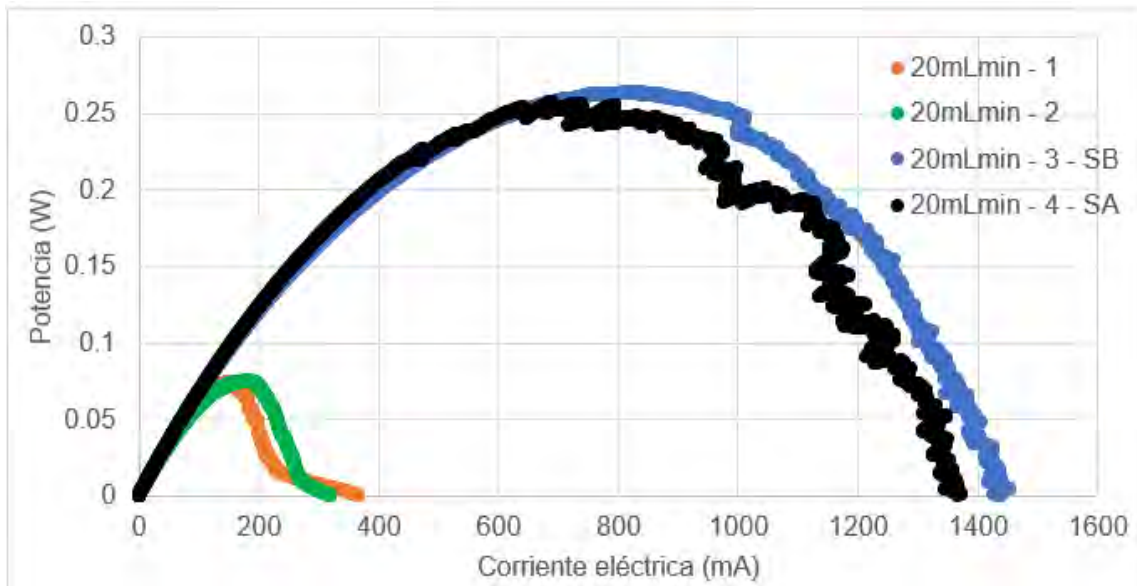


Figura 4.4 Curvas de potencia de acuerdo a curvas de polarización con variación de flujo en el cátodo.

En la figura 4.4 se observa que la potencia máxima de la celda sin ventilador es de 0.075 W, mientras que la celda con ventilador llega al máximo de 0.25 W. Cabe resaltar que la potencia máxima de la celda, con operación del ventilador a velocidad baja es mayor que la potencia máxima de la celda con velocidad de ventilador a flujo alto. Esta observación es atribuida que la celda se deshidratada con mayor rapidez y la temperatura disminuye por efecto de una convección forzada mayor. Como se describió en las curvas de polarización de la figura 4.3 debido a que al emplear el ventilador se obtiene corrientes mayores a las pruebas realizadas sin ventilador, en esta grafica se muestra que las curvas con ventilador obtienen mayor potencia debido a que se alcanza una corriente mayor ya que se reducen las pérdidas óhmicas y se mejora el transporte de masa.

A continuación, en la figura 4.5 se presentan cuatro curvas de polarización con variación de flujo en ánodo y cátodo. La curva negra tiene un flujo de 40 mL/min y convección natural, la curva naranja tiene un flujo menor de 20 mL/min a convección natural. La curva roja de 40 mL/min presenta una convección de aire forzada en la parte del cátodo (ventilador a baja velocidad) y por último la curva azul con un flujo de 20 mL/min con convección forzada.

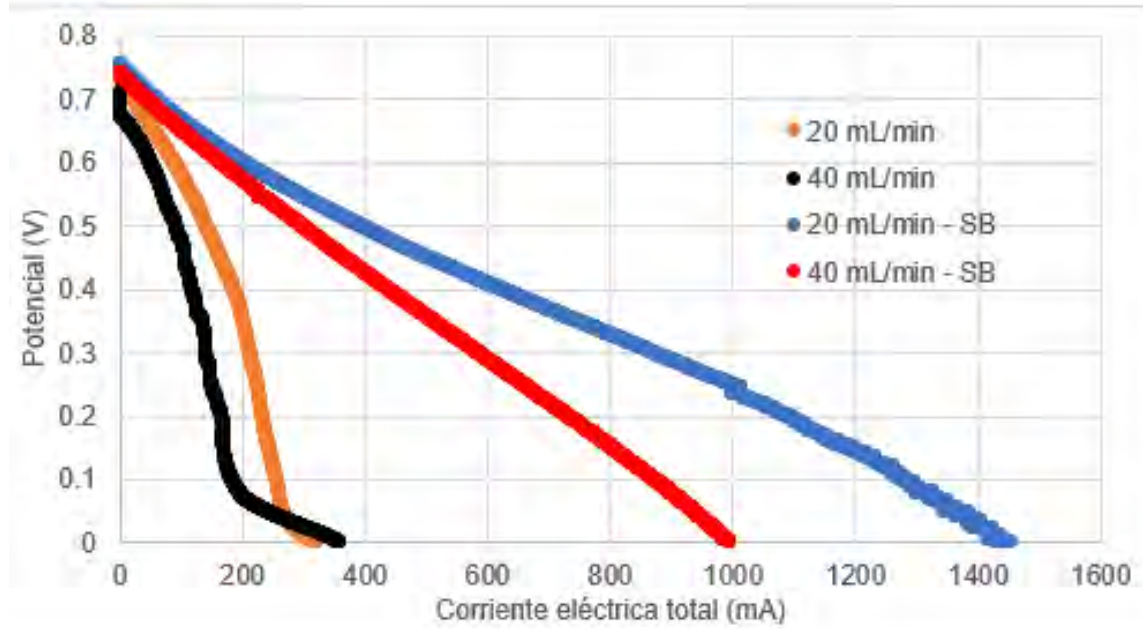


Figura 4.5 Curvas de polarización con variación de flujo en ánodo y cátodo.

Es apreciable en la figura 4.5 que al administrar flujos mayores de 20mL/min a la celda el desempeño de esta desciende drásticamente, este fenómeno se atribuye debido a que al suministrar flujos muy grandes la difusión de hidrógeno hacia la capa catalítica es limitada y el resultado se aprecia al ser la corriente menor en la celda.

La figura 4.6 presenta el desempeño del apilamiento de celdas de combustible construido para esta tesis. Este apilamiento permitirá cumplir con el objetivo general, de tal forma que se dimensiona para su aplicación futura en sistemas de recarga eléctrica portátil.

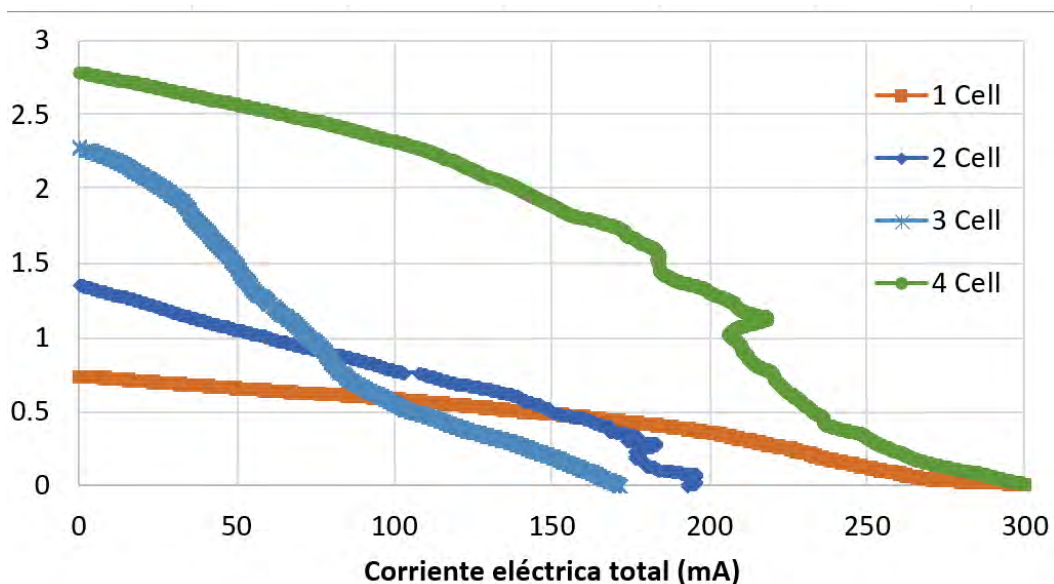


Figura 4.6. Curvas de polarización del apilamiento construido.

Se puede observar que el corriente límite varía en un rango entre 165 mA a 300 mA. Asimismo, resalta que el potencial de circuito abierto se mantiene en el rango de las monoceldas caracterizadas anteriormente (potencial entre 0.7 y 0.75 V). La figura 4.7 muestra las curvas de potencia del stack construido.

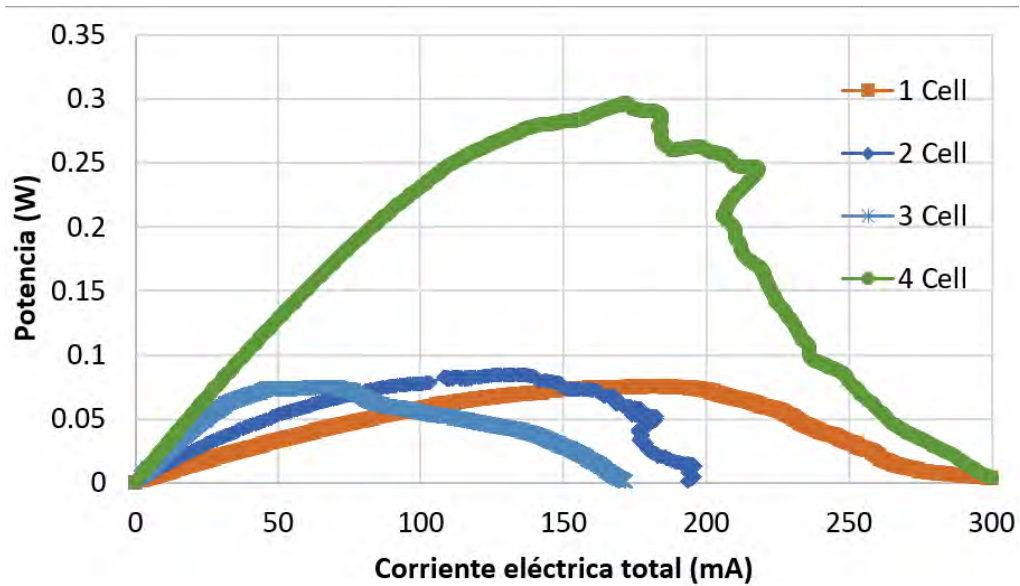


Figura 4.7. Curvas de potencia del apilamiento construido respecto a la corriente.

Es interesante observar que la potencia a corrientes bajas, menores a 50 mA, tiene un comportamiento de crecimiento lineal. Sin embargo, al aumentar la demanda de corriente los problemas de transporte de masa aumentan, lo cual modifica significativamente la potencia de salida, imposibilitando un comportamiento lineal de la potencia respecto al aumento de número de celdas. La figura 4.8 presenta la potencia del apilamiento construido, pero graficando la potencia con respecto al potencial total dividido sobre el número de celdas del apilamiento.

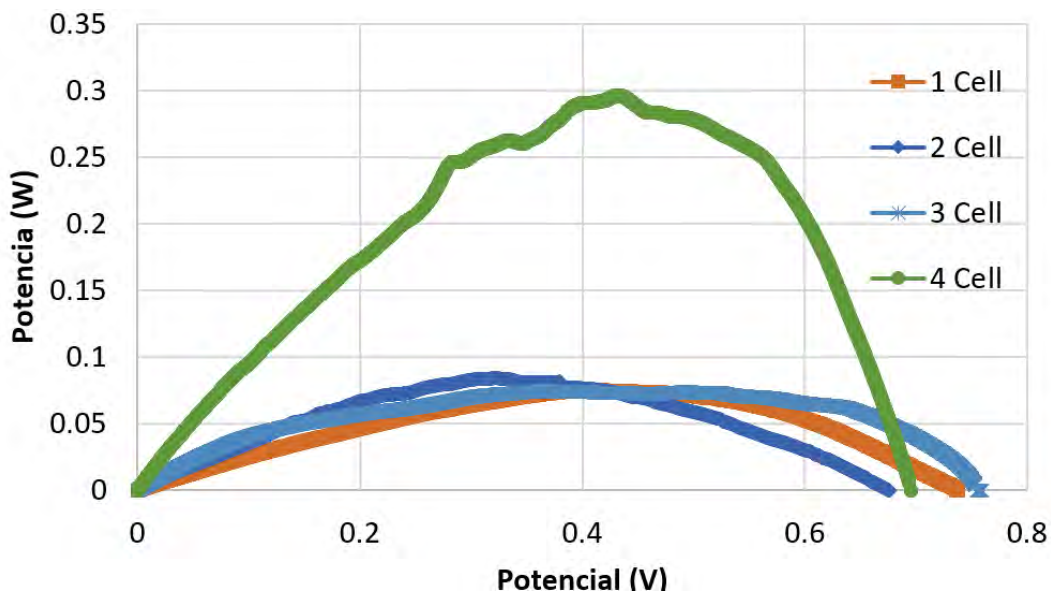


Figura 4.8. Curvas de potencia del apilamiento construido respecto al potencial por celda.

En las curvas de la figura 4.8 se puede observar que la potencia máxima de todas las celdas se encuentra entre 0.40 y 0.45. A partir de estos resultados, en la siguiente sección se realiza el dimensionamiento para la implementación futura del stack en sistemas de recarga eléctrica portátil.

4.2. Dimensionamiento para sistemas de recarga eléctrica portátil

Las curvas de polarización delimitan estrategias analíticas para dimensionar un apilamiento y analizar las perspectivas de implementación. La estrategia de dimensionamiento consiste en seleccionar un potencial o una corriente de diseño que permita variar, respectivamente, o el número de celdas o el área de la celda, para cumplir una potencia definida. Asimismo, la potencia nominal y la potencia pico de la carga, permiten estimar la factibilidad de la implementación. La tabla 4.1 resume los puntos más importantes de las curvas de polarización.

Tabla 4.1. Resultados de caracterización eléctrica.

	Potencia máxima (W)	Voltaje Pmax (V)	Voltaje por cell Pmax (V)	Corriente Pmax (mA)	Densidad Corr. Pmax (mA/cm ²)	Eficiencia (%)
Monocelda sin ventilación forzada	0.07	0.33	0.33	218.18	20.51	26.83
Monocelda con ventilación forzada	0.26	0.32	0.32	812.50	76.36	26.02
Stack sin ventilación forzada	0.29	1.76	0.44	164.77	15.49	35.77
Condiciones a eficiencia de 50% (0.6 V por celda)						
	Potencia (W)	Voltaje (V)	Voltaje por cell (V)	Corriente (mA)	Densidad Corr. (mA/cm ²)	Eficiencia (%)
Monocelda sin ventilación forzada	0.05	0.60	0.60	88.60	8.33	50
Monocelda con ventilación forzada	0.13	0.60	0.60	214.00	20.11	50
Stack sin ventilación forzada	0.20	2.40	0.60	85.30	8.02	50

Considerando las metas de diseño de la celda, se seleccionaron tres sistemas que requieren recarga eléctrica portátil: teléfono móvil, computadora laptop y dron comercial. Para estos cálculos se implementarán las ecuaciones de la sección 2.3 y los valores máximos de potencia y potencial. La tabla 4.2 resumen los resultados para la repetición sistemática de celdas con la misma área electroactiva de los resultados anteriores, en función de los parámetros presentados en la tabla 2.4.

Tabla 4.2. Resultados del dimensionamiento de acuerdo a las curvas de polarización.

Dimensionamiento con condiciones de monocelda sin ventilación forzada						
			Potencia Pico		Potencia Nominal	
Aplicación	Potencia Máx. (w)	Potencia Med. (w)	Voltaje operación Stack	#Celdas requeridas	Voltaje operación Stack	#Celdas requeridas
Teléfono móvil	3.00	1.70	13.75	42	7.79	24
Laptop	80.00	15.00	366.67	1,112	68.75	209
Dron	100.00	65.00	458.33	1,389	297.92	903
Dimensionamiento con condiciones de monocelda con ventilación forzada						
			Potencia Pico		Potencia Nominal	
Aplicación	Potencia Máx. (w)	Potencia Med. (w)	Voltaje operación Stack	#Celdas requeridas	Voltaje operación Stack	#Celdas requeridas
Teléfono móvil	3.00	1.70	3.69	12	2.09	7
Laptop	80.00	15.00	98.46	308	18.46	58
Dron	100.00	65.00	123.08	385	80.00	250
Dimensionamiento con condiciones de stack sin ventilación forzada						
			Potencia Pico		Potencia Nominal	
Aplicación	Potencia Máx. (w)	Potencia Med. (w)	Voltaje operación Stack	#Celdas requeridas	Voltaje operación Stack	#Celdas requeridas
Teléfono móvil	3.00	1.70	18.21	42	10.32	6
Laptop	80.00	15.00	485.52	1,104	91.03	52
Dron	100.00	65.00	606.90	1,380	394.48	225

Como ya se ha observado en las curvas de polarización el desempeño eléctrico entre usar y no usar un sistema de ventilación forzada, es drástico. En estos resultados el número de celdas requerido sin ventilación forzada es un poco menos de cuatro veces las requeridas con ventilación forzada. En condiciones sin ventilación forzada, también resalta la magnitud tan grande de celdas requeridas, para la potencia máxima de la laptop y del dron, en ambos casos más de mil celdas.

Considerando el espesor de la monocelda de 1.2 mm (contemplando todos los componentes), para la potencia máxima demandada, usando las condiciones de ventilación forzada (porque nos conviene ser optimistas): para el celular requeriríamos una celda de 1.4 cm, para la laptop 36.9 cm y para el dron 46.2 cm; en volumen esto significa 0.05 Lt para el celular, 1.01 Lt para la laptop y 1.27 Lt para el dron. Asimismo, en los comentarios más importantes que hay que resaltar, es que esta información de dimensión y volumen es únicamente por la celda de combustible, al sistema de recarga eléctrica portátil, aún habría que añadirle un tanque hidrógeno y los sistemas periféricos para su operación.

Por otro lado, los resultados nos permiten una perspectiva de implementación de sistemas híbridos de almacenamiento de energía. Por ejemplo, con esta información, para la

laptop, el uso de supercapacitores nos puede permitir la propuesta de usar un stack, sin ventilación forzada, de 52 celdas (0.17 Lt) y para el dron 225 celdas (0.74 Lt).

Otras configuraciones y prospectivas pueden ser previsualizadas a partir de estos resultados, sin embargo, las tres observaciones más relevantes son: 1) para satisfacer potencias pico de los sistemas, la celda debe operar con ventilación forzada. 2) Para la potencia de ~100W (ejemplo de potencia máxima del dron) la celda actual no es factible de implementar, el volumen ocupado por el stack es muy grande, por lo que la densidad de corriente y densidad de potencia debe ser mejorada. 3) La observación optimista, para potencias bajas ~3W (ejemplo de potencia máxima de un teléfono móvil), la celda actual puede ser implementada sin modificaciones; esta situación nos permitiría hacer demostraciones de la tecnología y propiciar la apropiación social del conocimiento.

Conclusiones

En comparación con las celdas convencionales, se obtuvo un dispositivo compacto y ligero. Se mejoró la respuesta eléctrica en comparación con el diseño antecedente de nuestro laboratorio de investigación y sobre todo se realizó un apilamiento de mayor potencia. Estos resultados nos permiten una perspectiva más real para la visualización de la aplicación en sistemas de recarga eléctrica portátil. En este aspecto se debe concluir que el diseño tiene que ser mejorado, optimizando el rendimiento eléctrico para reducir el volumen de la celda en aplicaciones de la laptop y dron (potencias mayores a 80 W).

Respecto a los resultados experimentales del desempeño eléctrico se pueden mencionar tres puntos más relevantes: 1) la monocelda con ventilación forzada alcanzó una potencia de 0.26 W a 0.32 V con una corriente total de 812 mA; el stack de cuatro celdas con ventilación forzada, en teoría, debería alcanzar 1.04 W con 1.28 V; sin embargo, esas pruebas no fueron posibles de realizar por falta de condiciones en la estación de pruebas. 2) El apilamiento de 4 celdas sin ventilación forzada alcanzó una potencia de 0.29 W a 1.76V, lo cual es un resultado muy positivo, principalmente porque supera la perspectiva lineal de la monocelda sin ventilación forzada. 3) La celda actual se puede implementar sin modificaciones para la recarga de celulares de baja potencia $\sim 3W$, sin embargo para implementaciones en computadoras laptop, y/o drones, el desempeño de la celda debe ser mejorara; esto es posible aumentando el transporte de masa al usar materiales con mayor porosidad.

Perspectiva: La perspectiva principal es mejorar la respuesta eléctrica, se puede lograr de diversas maneras, la principal es mejorar el transporte de masa en cátodo. Lo cual puede ser lograr con mejores materiales porosos o con un canal más grande en la placa bipolar.

Referencias

- [1] Wang Yun, et al. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*. 2011; 88:981-1007.
- [2] Barbosa R. Tesis de maestria: Construction y evaluación de un generador de alta densidad de potencia eléctrica mediante celdas de combustible. UNAM,2007.
- [3] Pacheco C. Tesis de maestria: Diseño y validación de una celda de tamaño milimétrico. CYCY,2017.
- [4] Fan Zhang, Pengcheng Zhao, Meng Niu, Jon Maddy. The survey of key technologies in hydrogen energy Storage. *International journal of hydrogen energy* xxx (2016) 1-18.
- [5] Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. Tiago Sinigaglia, Felipe Lewiski, Mario Eduardo Santos Martins, Julio Cezar Mairesse Siluk. *International journal of hydrogen energy* 42 (2017) 24597 - 24611
- [6] Salvi BL, Subramanian KA. Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system. *Renew Sustain Energy Rev* 2015; 51:1132-55
- [7] L. van Biert et al. A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources* 327 (2016) 345-364.
- [8] Himadry Shekhar Das et al. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017) 268–291.
- [9] www.srl.gatech.edu, July 21, 2014
- [10] Kuan- Wen Kuo. Tesis licenciatura: Diseño y validación experimental de una celda de combustible de alta densidad de potencia eléctrica.2016.
- [11] Varela, F. J. R.; Fera, O. S.; Pacheco, E. H., *Celdas de combustible*, Canada, 2010,
- [12] W.R.W. Daud et al. PEM fuel cell system control: A review. *Renewable Energy*.2017.
- [13] Larminie, J., Dicks, A., 2003. *Fuel Cell System Explained*, second ed.
- [14] A. Baroutaji et al. *Materials in PEM Fuel Cells*. Elsevier.2016
- [15] Elsevier«Tetrahedron Letters » Available: <https://www.journals.elsevier.com/tetrahedron-letters>. [Último acceso: 04/septiembre 2018]
- [16] «ScienceDirect.» Available: <https://www.sciencedirect.com/>. [Último acceso: 04/Septiembre 2108]
- [17] Elsevier, «International Journal of Hydrogen Energy.,» [En línea]. Available: <https://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-hydrogen-energy/>. [Último acceso: 04/septiembre 2018]
- [18] J. Fernandez-Moreno et al. A portable system powered with hydrogen and one single air-breathing PEM fuel cell. *Applied Energy* (2013) 60-66.
- [19] A. M Chaparro, B. Gallardo, M.A Folgado, A. J Martinez, L. Daza, PEMFC electrode preparation by electrospray: Optimization of catalyst load and ionomer content, *Catalysis Today*,143,237-241,2009.
- [20] N. Rajalakshmi, K.S. Dhathathreyan, Catalyst layer in PEMFC electrodes-Fabrication, characterization and analysis, *Chemical Engineering Journal*, 29,31-40,2007.
- [21] Elsevier, «Journal of Power Sources .,» [En línea]. Available: <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-power-sources/>.. [Último acceso: 2018 septiembre 4].
- [22] Scott D. Thompson, Larry R Jordan, Maria Forsyth, Platinum electrodeposition for polymer electrolyte membrane fuel cells, *Electrochimica Acta*, 46,1657-1663,2001.

- [23] Samaneh Shahgaldi et al, «Development of a low temperature decal transfer method for the fabrication of proton exchange membrane fuel cells,» international journal of hydrogen energy, vol. 42, pp. 11813 - 11822, 2017.
- [24] SPIEGEL, C. "Designing and Building Fuel Cells". Mc Graw Hill. 2007.
- [25] BARBIR, F. "PEM Fuel Cells: Theory and Practice". Elsevier Academic Press. 2005.
- [26] DJI «SPARK» [En línea]. Available:
https://dl.djicdn.com/downloads/Spark/20180209/Spark_Quick_Start_Guide_V1.6_EU.pdf
[Ultimo acceso: 20/octubre 2018]