

**DESARROLLO DE PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE CON
MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO**

**DAVID FELIPE GUERRERO GUEVARA
JORGE KEVIN MONCAYO MUNÑOZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRONICA
SAN JUAN DE PASTO
2018**

**DESARROLLO DE PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE CON
MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO**

**DAVID FELIPE GUERRERO GUEVARA
JORGE KEVIN MONCAYO MUNÑOZ**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

**DIRECTOR
M.Sc. JAIME RUIZ
INGENIERO ELECTRONICO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRONICA
SAN JUAN DE PASTO
2018**

Nota de responsabilidad

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma Presidente del jurado

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

San Juan de Pasto, Diciembre del 2018

AGRADECIMIENTOS

Hoy, después de muchos días de estudio y esfuerzo, se culmina una etapa más en mi vida académica, no sé qué vendrá en los próximos años, pero me siento completamente humilde y agradecido con todas y cada una de las personas que contribuyeron directa o indirectamente con mi formación en todos estos 26 años.

Tengo el agrado de decir que hasta ahora he estado en todos los lugares que he querido y que afortunadamente he pertenecido a todas las instituciones que he deseado. Le agradezco a mi compañero de trabajo de grado por su infinita paciencia y a la Universidad de Nariño que me ha permitido crecer y volverme profesional, no sin antes hacer un llamado a la mejora de la educación y de la carrera como tal.

Kevin Moncayo.

DEDICATORIA

Este trabajo es el fruto del esfuerzo realizado por más de tres años, muchas veces con dificultades, pero al fin se obtuvieron resultados exitosos. Le dedico este trabajo a mis Padres que tanto ansían mi consecución del título de Ingeniero Electrónico, a mis abuelos por proveerme de las herramientas necesarias, a mis tíos por ser parte de mi crecimiento y desarrollo, a mis hermanos por ser mi fuente de inspiración, a mis primos y amigos por siempre estar dispuestos en ayudarme y por último y no por eso menos importante, a mi querida Novia, Sofía Rosales, quien ha sido mi apoyo incondicional por más de 8 años este es tan solo un paso más en el largo camino que vamos a emprender!!!

Kevin Moncayo.

“La lectura hace al hombre completo; la conversación lo hace ágil; el escribir lo hace preciso” *Francis Bacon.*

A mis padres y a mi familia por comprenderme y apoyarme en todo momento.

David Guerrero

RESUMEN

En la presente investigación se construyó un prototipo de celda de combustible con membrana de intercambio protónico (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell), la cual se define como un dispositivo electroquímico que convierte energía química en energía eléctrica en un solo paso y sin la generación de agentes contaminantes; la parte más importante de una PEMFC es el ensamble membrana electrodos (MEA, Membrane Electrode Assembly) el cual fue acoplado mediante la técnica de prensado en caliente (Hot Press) bajo las siguientes condiciones: temperatura de 120 °C , presión de 20 kg/cm² durante 5 minutos. Respecto a las demás partes de la celda; el plato distribuidor de gas se elaboró a partir de láminas de grafito mediante maquinado CNC, utilizando como medidas de: ancho de canal, separación entre canales y profundidad de canal 1 mm; posteriormente la carcasa se elaboró a partir de plástico PLA mediante impresión 3D. La caracterización eléctrica se realizó a través del método de curva de polarización, de la cual se obtuvo el punto de máxima densidad de potencia para la celda prototipo en 1.2386 mW/cm², correspondiente al 87 % del punto de máxima densidad de potencia en comparación a la celda comercial marca Horizon, el cual fue de 1.4192 mW/cm². Finalmente se concluye que las celdas de combustible tipo PEM pueden entregar la potencia suficiente para alimentar aplicaciones prácticas como: un vehículo y un sistema de ventiladores.

ABSTRACT

For the present work, a fuel cell prototype with proton exchange membrane (PEMFC, proton exchange membrane fuel cell) was built, which is defined as an electrochemical device that converts chemical energy into electrical energy in a only step and without the generation of pollutants; The most important part of a PEMFC is the electrode membrane assembly (MEA, membrane electrode assembly) that was coupled using the hot pressing technique under the following conditions: temperature of 120 °C, pressure of 20 kg/cm² for 5 minutes. With respect to the other parts of the cell, the gas distribution plate was made from graphite sheets by CNC machining, using as measures of: channel width, channel spacing and channel depth 1 mm; Subsequently, the housing was made of plastic PLA by 3D printing. The electrical characterization was carried out through the polarization curve method, finding the point of maximum power density for the prototype cell at 1.2386 mW/cm² which corresponds to 87% of the power density point maximum compared to the Horizon commercial cell, which was 1,4192mW/cm². Finally, it is concluded that PEM fuel cells can deliver enough energy to power practical applications such as: a vehicle and a fan system.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	16
JUSTIFICACIÓN.....	17
OBJETIVOS.....	19
Objetivo general	19
Objetivos específicos	19
ALCANCE	20
MARCO TEORICO	21
Introducción a las celdas de combustible:	21
Orígenes de las celdas de combustible.....	21
Clases de celdas de combustible	23
Celdas de combustible tipo PEMFC.....	25
Ensamble de Membrana electrodos (MEA).....	31
Partes que componen una celda PEMFC:	33
Caracterización eléctrica en una celda PEMFC:	38
1. METODOLOGIA	42
1.1. Elaboración del ensamble membrana - electrodos.....	42
1.2. Proceso de ensamble del prototipo	48
1.3. Procedimiento toma de curva de polarización	55
2. RESULTADOS	60
2.1. Resultados elaboración de partes	60
2.2. Proceso de ensamble del prototipo de celda de combustible con membrana de intercambio protónico.....	63
2.3. Pruebas eléctricas y curvas de polarización	69
2.4. Aplicaciones con celdas tipo PEM	72
2.4.1. Sistema de ventiladores:	75
2.4.2. Aplicación de Vehículo con celdas de combustible tipo PEMFC:.....	79
3. CONCLUSIONES	91
4. RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de celda de combustible.....	24
Tabla 2. Parámetros para ensamble del MEA	47
Tabla 3. Propiedades placa de grafito comercial	49
Tabla 4. Dimensiones canales de flujo	50
Tabla 5. Pruebas preliminares en prototipo de celda PEMFC	69
Tabla 6. Comparación puntos de máxima eficiencia.....	72
Tabla 7. Pruebas preliminares en prototipo de celda PEMFC.	76
Tabla 8. Características del sistema de ventiladores.....	76

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Experimento de William Grove, primera celda denominada Fuel Cell.	22
Fig. 2. Modelo experimental de Mond y Langer.	23
Fig. 3. Esquema simplificado celda de combustible con membrana de intercambio protónico	25
Fig. 4. Esquema Simplificado de una PEMFC	27
Fig. 5. Funcionamiento simplificado oxidación hidrogeno. [A] Átomo de hidrogeno. [B] Átomo de hidrogeno en contacto con el electrodo. [C] Protón y electrón de hidrogeno. [D] Protón y electrón de hidrogeno separados por la membrana.....	28
Fig. 6. Funcionamiento simplificado oxidación hidrogeno. [A] Átomo de hidrogeno. [B] Átomo de hidrogeno en contacto con el electrodo. [C] Protón y electrón de hidrogeno. [D] Protón y electrón de hidrogeno separados por la membrana.....	28
Fig. 7. Oxidación del hidrogeno para múltiples átomos.	29
Fig. 8. Proceso de reducción del oxígeno en el funcionamiento de una PEMFC. [A] Molécula de di-oxígeno. [B] Molécula de di-oxígeno en contacto con el electrodo. [C] Átomo de oxígeno en contacto con los protones de hidrogeno. [D] Formación estructural molécula.....	30
Fig. 9. Efecto de un circuito externo en el funcionamiento de una PEMFC. [A] Conexión resistencia externa. [B] Movimiento de electrones. [C] Movimiento de electrones. [D] Movimiento de electrones. [E] Formación molécula de agua.....	31
Fig. 10. Efecto de un circuito externo en el funcionamiento de una PEMFC.	32
Fig. 11. Partes principales de una PEMFC. [A] Vista generalizada de los componentes de una PEMFC. [B] Vista detallada de los elementos constituyentes del MEA.	33
Fig. 12. Detalle de zona común. [A] Vista en ángulo de los componentes del MEA. [B] Vista frontal de los elementos constituyentes del MEA. [C] Demarcación en color azul resaltado dentro de un marco amarillo del área común entre la membrana y los electrodos.....	35
Fig. 13. Esquema de montaje para toma de curva de polarización	39
Fig. 14. Esquema de curva de polarización.	40
Fig. 15. Nafion 117 posterior al tratamiento de activación.	43
Fig. 16. Corte de un electrodo.....	44
Fig. 17. Diagrama esquemático de sistema Hot-press	45

Fig. 18. Prototipo de Hot-Press utilizado para el ensamble del MEA.....	45
Fig. 19. Procedimiento de medición de continuidad al MEA	47
Fig. 20. Problema de desfase de electrodos en el MEA. [A]. [B].....	48
Fig. 21. Placa de grafito adquirida comercialmente	48
Fig. 22. Planos plato distribuidor de gas. Dimensiones en [mm].....	50
Fig. 23. Impresora Freaks 3D.	51
Fig. 24. Planos de la pieza No.1 de la carcasa plástica. Dimensiones en [mm]. ...	52
Fig. 25. Planos de la pieza No.2 de la carcasa plástica. Dimensiones en [mm]. ..	54
Fig. 26. Electrolizador marca Horizon	56
Fig. 27. Incubadora con su respectivo circuito de control.	56
Fig. 28. Montaje toma de curva de polarización.....	57
Fig. 29. Proceso de activación PEMFC. [A] Prueba eléctrica PEMFC circuito abierto. [B] Prueba eléctrica PEMFC corto circuito.	58
Fig. 30. Celda comercial tipo PEM tomada como referencia.	58
Fig. 31. MEA obtenido posterior al proceso de Hot-Press en: [A] esta investigación, [B] en la investigación de Hernandez (2011).	61
Fig. 32. Platos distribuidores de gas. [A] ´esta investigación, [B] investigación de Jaramillo (2013)	62
Fig. 33. Componentes prototipo PEMFC: platos distribuidores de gas y pieza No. 1	63
Fig. 34. Componentes prototipo PEMFC: Pieza No.2.....	63
Fig. 35. Elaboración sellos de silicona en la pieza No.2.	64
Fig. 36. Instalación de rieles en el ensamblaje.	64
Fig. 37. Ensamble plato distribuidor de gas, cable de cobre y pieza No. 1.....	65
Fig. 38. Sello de posibles fugas de gas con ayuda de silicona en el ensamble de la figura anterior.....	66
Fig. 39. Ensamble temporal celda de combustible tipo PEM	66
Fig. 40. Aplicación de puntos de silicona en las esquinas del MEA.....	67
Fig. 41. Instalación del MEA en el ensamble general.	67
Fig. 42. Referencia de instalación del segundo plato distribuidor de gas en el ensamble general.	68
Fig. 43. Prototipo de celda ensamblada.....	68
Fig. 44. Prototipo de celda ensamblada.....	69

Fig. 45. Curva de polarización celda comercial.....	71
Fig. 46. Curva de polarización celda prototipo.	71
Fig. 47. Beaker y recipiente en forma de campana.....	73
Fig. 48. Correcto ensamble de la campana en el interior del beaker.	73
Fig. 49. Nivel de agua en el beaker.	74
Fig. 50. Nivel de agua en el beaker.	74
Fig. 51. Sistema de ventiladores con celdas PEMFC	75
Fig. 52. Representación circuital del Sistema de ventiladores.	76
Fig. 53. Dimensiones soporte tanque de hidrogeno.....	77
Fig. 54. Dimensiones soporte ventiladores.	78
Fig. 55. Dimensiones soporte interruptor.	78
Fig. 56. Dimensiones soporte de celdas.	79
Fig. 57. Prototipo de automóvil con STACK de celdas tipo PEMFC.	80
Fig. 58. Representación circuital del automóvil.....	80
Fig. 59. Dimensiones chasis de acrílico.	81
Fig. 60. Dimensiones soporte moto-reductor.	82
Fig. 61. Dimensiones soporte tanque de hidrogeno.....	82
Fig. 62. Dimensiones soporte tren delantero.	82
Fig. 63. Dimensiones plato distribuidor de gas.	83
Fig. 64. Dimensiones plato distribuidor de gas.	84
Fig. 65. Dimensiones plato distribuidor de gas tipo serpentín doble.	84
Fig. 66. Dimensiones plato distribuidor de gas tipo serpentín doble.	85
Fig. 67. Dimensiones Platos distribuidores de gas Oxigeno.	85
Fig. 68. Dimensiones Platos distribuidores de gas Oxigeno.	86
Fig. 69. Dimensiones Sello de látex S1.	87
Fig. 70. Dimensiones Sello de látex S2.	87
Fig. 71.MEA	87
Fig. 72. Introducción de tornillos en PARTE 1.	88
Fig. 73. Instalación de sello de látex S1.....	89
Fig. 74. Insertando plato distribuidor tipo serpentín doble.	89
Fig. 75. Implementación de sellos S2.	90

Fig. 76. Deposición de MEAs.....90

Fig. 77. Implementación de sellos S2.91

Fig. 78. Ensamble final de STACK.....91

GLOSARIO

PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell - Celda de combustible con membrana de intercambio protónico; Es un dispositivo electroquímico que convierte energía química en energía eléctrica en un solo paso y sin la creación de agentes contaminantes.

MEA: Membrane Electrode Assembly - Ensamble Membrana Electroodos; Es la parte central de la celda que se constituye de la membrana de intercambio protónico y dos electrodos catalizadores. Se encarga de producir la reacción electroquímica necesaria para separar los electrones del combustible.

ELECTRODO: Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica; los electrodos positivo y negativo se llaman Ánodo y Cátodo respectivamente.

CATALIZADOR: Que acelera o retarda una reacción química sin participar en ella.

ION: Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro. Conceptualmente esto se puede entender como que, a partir de un estado neutro de un átomo o molécula, se han ganado o perdido electrones; este fenómeno se conoce como Ionización.

ÁNODO: Es el lugar donde se produce la reacción de Oxidación, que provoca un aumento en el estado de Oxidación.

REACCIÓN DE OXIDACIÓN: La Oxidación es una reacción química donde un elemento cede electrones y por lo tanto aumenta su estado de oxidación.

CÁTODO: Es el lugar donde se produce la reacción de reducción, que provoca una disminución en el estado de Oxidación.

REACCIÓN DE REDUCCIÓN: En química, reducción es un proceso electroquímico por el cual un átomo o un ion gana electrones. Implica la disminución de su estado de oxidación. Este proceso es contrario al de oxidación.

ELECTROLITO: Es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres y que en este caso hace que se comporte como conductor de protones.

INTRODUCCION

A partir de su descubrimiento en el año 1838 por William Grove hasta el día de hoy, son bastantes los progresos en materia de las celdas de combustible con membrana de intercambio protónico. Desde autopistas en Noruega con el proyecto HyNor (HyNor project for H2 road in Norway, 2005), con cerca de 350 millas de longitud y múltiples estaciones de abastecimiento de gases reactivos a lo largo de la vía, promueven el uso de vehículos cuyo motor es 100 % eléctrico y cuya fuente de energía son las celdas de combustible principalmente; hasta misiones espaciales de la NASA como los programas Gemini y Apolo (Enrique, 2016); son bastantes las aplicaciones de las celdas de combustible tipo PEM en toda su vasta historia hasta la actualidad.

En el presente proyecto de grado, se decidió investigar sobre las celdas tipo PEM que son consideradas, una línea de investigación en energías alternativas y se planteó como objetivo construir una mediante las técnicas aprendidas a lo largo de la carrera y con la tecnología disponible en nuestro medio. Se tuvo como finalidad mejorar el desempeño eléctrico de las PEMFC, introduciéndolas en el ámbito electrónico y contemplando la viabilidad de desarrollar futuras investigaciones.

En la actualidad en cuanto a la elaboración de componentes para celdas, se emplean tecnologías de fabricación como lo es la impresión en 3D y el maquinado CNC, ya que (Barcenas, Duarte, Ramirez, & Orozco, 2017) afirma, que se obtienen partes de alta resolución, se reducen los tiempos de maquinado y los costos de fabricación en las celdas tipo PEM en comparación a otros métodos. Con las técnicas anteriormente mencionadas, se ha logrado reemplazar la carcasa de la celda, que inicialmente se elaboraba con metales como el aluminio, que dificultaban su maquinado y elevaba los costos.

Para llevar a cabo el prototipo de celda fue necesario desarrollar un trabajo interdisciplinar entre Química e Ingeniería Electrónica; eventualmente la celda se construyó de forma exitosa y se culminó con la respectiva caracterización eléctrica de la misma y de una celda tipo PEM adquirida comercialmente con el fin de tener un punto de referencia para las respectivas comparaciones.

Finalmente se construyó un vehículo y un sistema de ventiladores que funcionan con hidrógeno, con el fin de introducir de forma didáctica el uso de las celdas tipo PEM al ámbito cotidiano.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente, el mundo atraviesa por un problema energético con un panorama complicado ya que se presencia un inminente agotamiento de las reservas de combustibles fósiles (hidrocarburos) y una acelerada contaminación global producto del uso de este tipo de combustibles, por lo tanto buscar energías alternativas limpias se hace una necesidad prioritaria (Cortes Marir, Ciro Velazquez, & Moreno Cardenas, 2011), (Saavedra, 2010).

Debido al potencial de reducir el impacto ambiental y las consecuencias geopolíticas del uso de combustibles fósiles, las celdas de combustible han surgido como interesantes alternativas a los motores de combustión. En adición a su alta eficiencia y bajas emisiones, las celdas de combustible son atractivas por su naturaleza modular y cero contaminaciones auditivas (Uda & Haile, 2005).

A pesar de que existen múltiples tipos de celdas, en el presente proyecto se decidió trabajar con las celdas de combustible con membrana de intercambio protónico, debido a que son celdas de tipo portable que funcionan para aplicaciones estacionarias y móviles, operan en un rango de temperatura entre 50-150 °C por lo que son ampliamente usadas en aplicaciones de baja temperatura, pueden generar una apreciable potencia de salida de 250 kW y una densidad de corriente entre 1000-4000 mA/cm²; teniendo únicamente como subproductos de la reacción: calor y vapor de agua. (R. Bakiya, N.P., & A. Vimala, 2017).

Respecto a Colombia actualmente existen leyes e incentivos, principalmente de carácter tributario, que promueven el desarrollo de las energías renovables. Sin embargo, en el país aún se requiere profundizar en estudios que generen cuantificaciones continuas del potencial de implementación de fuentes no convencionales de energía, de manera que se mejoren las políticas energéticas, permitiendo establecer estrategias a largo plazo que involucren los componentes sociales y ambientales (Ortiz, Sabogal, & Huertado, 2012).

Es posible que, en la transición del uso de combustibles fósiles al uso de combustibles alternativos, las celdas de combustible con membrana de intercambio protónico jueguen un rol importante debido a las características anteriormente mencionadas, por lo tanto, puede ser de gran utilidad empezar a realizar investigaciones al respecto en nuestro ámbito académico.

Finalmente, con el desarrollo del presente proyecto se espera brindar la posibilidad de realizar futuras investigaciones que conlleven a la optimización del sistema en cuestión, enfocándose a mejorar la eficiencia de la celda. Lo anterior debido a que la ejecución de este proyecto de grado podría ser considerado como

el punto de partida para futuras investigaciones en el área de celdas de combustible con membrana de intercambio protónico en la Universidad de Nariño.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un prototipo de celda de combustible con membrana de intercambio protónico para una aplicación de baja potencia.

Objetivos específicos

- Acoplar el ensamble membrana electrodos por medio de la técnica de prensado en caliente.
- Construir un prototipo de celda de combustible con membrana de intercambio protónico usando carcasa plástica en PLA y platos distribuidores de gases elaborados a partir de grafito.
- Obtener el punto de máxima densidad de potencia del prototipo de celda empleando la técnica de curva de polarización.

ALCANCE

Al final del presente proyecto se desea obtener los siguientes productos:

- Sistema de fácil implementación el cual permita aplicar la técnica de Hot-press enfocada a desarrollar el MEA. El sistema se acoplará a una prensa hidráulica, la cual permitirá aplicar presión que se medirá en unidades psi. El sistema constará de dos discos de aluminio perforados en su contorno con cinco agujeros. Estos agujeros servirán para introducir cuatro resistencias que son empleadas como calefactores y un sensor de temperatura. Lo anterior con el fin de implementar un controlador PID de temperatura aplicando cuidadosamente calor mediante el sistema y presión mediante la prensa hidráulica al mismo tiempo.
- Metodología para elaborar el MEA. Con la implementación del prototipo anteriormente mencionado y basados en condiciones de temperatura, presión y tiempo de prensado; otorgadas por la literatura (Hernandez & Martinez, 2011), se obtendrá una metodología basada en nuestras condiciones de operación.
- Platos distribuidores de gas, los cuales se elaboran a partir de láminas de grafito de baja porosidad. Son dos discos a los cuales se les grabará en un lado de su superficie unos canales para permitir el flujo de gases reactantes. Las dimensiones y la forma del grabado dependerán de la literatura (Jaramillo & Ocampo, 2013).
- Platos colectores de corriente, elaborados a partir de láminas de cobre de alta pureza. Su forma y dimensiones dependerán del diseño de la carcasa.
- Carcasa plástica, elaborada a partir de material PLA por medio de una impresora 3D con el fin de acoplar las diferentes partes del prototipo de PEMFC.
- Curvas de polarización, aplicando la metodología de curvas de polarización se obtendrán graficas de voltaje contra densidad de corriente y densidad de potencia contra densidad de corriente. que caracterizan el comportamiento eléctrico del prototipo de PEMFC y de las cuales se deducirá el punto de máxima densidad de potencia.

MARCO TEORICO

Introducción a las celdas de combustible:

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman la energía química almacenada por un combustible (H_2 y O_2) en energía eléctrica (CD) en un solo paso (Gutierrez Garcia, 2015).

Tradicionalmente, un proceso de generación de electricidad a partir de combustibles fósiles involucra varios pasos de conversión de energía. Por ejemplo, el motor de combustión de una planta eléctrica implica una serie de pasos o procesos termodinámicos como son: la admisión, compresión, expansión y expulsión de manera que en cada paso hay pérdidas energéticas.

Una celda de combustible no tiene en cuenta todos estos procesos termodinámicos como en la combustión en un motor de manera que genera electricidad en un solo paso y se obtienen altas eficiencias (Mejia & Alvarez, 2015).

Las celdas de combustible aparte de generar energía en un solo paso, son considerados dispositivos que no tienen partes móviles (partes mecánicas) de manera que funcionan de forma más fiable y emiten menos ruido (Sajquire & Kachare, 2016), esto significa que se reducirán los costes de mantenimiento en comparación con otros sistemas de generación que emplean partes móviles, como lo son los motores de combustión.

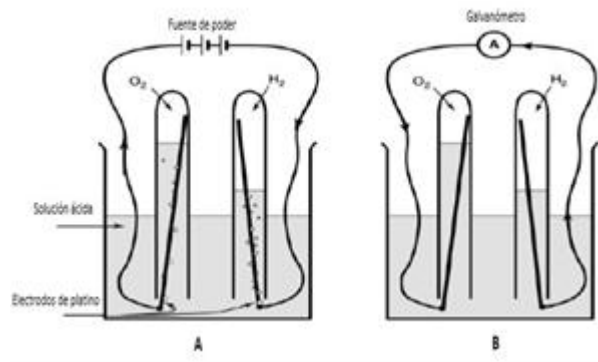
Las baterías tradicionales y las celdas de combustible, ambas tienen en su estructura la misma configuración. Las dos disponen de un conjunto de ánodo, cátodo y electrolito. Sin embargo, las baterías agotan su combustible sin que este se pueda sustituir al estar contenido en su interior, mientras que una celda de combustible funcionara indefinidamente mientras se mantenga el flujo de combustible en operación. No obstante, en la práctica, los problemas de corrosión y degradación de los materiales que componen la celda de combustible pueden limitar su vida útil (Hernandez & Martinez, 2011).

Orígenes de las celdas de combustible

Las celdas de combustible hicieron su aparición en el año de 1839 en el Reino Unido, de la mano del abogado y científico William Grove, al realizar un experimento como el que se muestran en la Figura 1. El experimento consistía en introducir delgados electrodos de platino en el interior de tubos de ensayo

invertidos en presencia de una solución acida contenida en un beaker. Luego se accionaba una fuente de poder, produciendo una electrolisis entre los dos electrodos, obteniendo los respectivos gases, hidrogeno y oxígeno.

Fig. 1. Experimento de William Grove, primera celda denominada Fuel Cell.



Fuente: Tomado de Leone (2011).

El montaje mostrado en la Figura 1, es una demostración adecuada para la época en la que William Grove existió. Sin embargo, estas eran celdas de combustible que son consideradas desde el punto de vista práctico, como celdas de baja potencia. Por las siguientes razones: el área de contacto entre el gas, el electrodo y electrolito es muy pequeña, solo sobresale un pequeño filamento de platino del electrolito, además se puede ver que existe una larga distancia entre los electrodos; puesto que el electrolito es considerado como una resistencia para el flujo de iones (Hernandez & Martinez, 2011)

Cincuenta años más tarde, en 1889 Mond y Langer retoman los trabajos realizados por William Grove; el trabajo de Mond y Langer consistió en modificar el diseño experimental mostrado en la Figura 1, por el modelo que se muestra en la Figura 2, al que denominaron "Fuel Cell". En este modelo fueron agregadas modificaciones importantes, entre ellas se puede mencionar: accesos para la entrada y salida de gases reactivos (H_2 y O_2), sustitución de los delgados electrodos de platino por finas laminas perforadas en forma cuadrada e intercambio de un electrolito líquido por uno sólido. Finalmente, con las anteriores modificaciones, se logró reducir el espacio entre electrodos y electrolito de manera que cuando este sistema entró en funcionamiento, alcanzó a generar aproximadamente (0.97 V - 6 A/pie²) (Leone, 2011).

Fig. 2. Modelo experimental de Mond y Langer.



Fuente: Tomado de (Hernandez & Martinez, 2011).

Cabe resaltar que el modelo mostrado en la figura anterior, se utiliza actualmente en la mayoría de los sistemas de celdas de combustible con membrana de intercambio protónico.

Clases de celdas de combustible

En la actualidad existen diferentes clases de celdas de combustible, todas se componen de un ánodo, un cátodo y un electrolito. Sin embargo, la naturaleza del electrolito y los electrodos les otorga diferentes finalidades de funcionamiento y características, como lo son la temperatura de operación, el tipo de combustible, los materiales utilizados en su construcción, la vida útil y el área de aplicación.

En la siguiente tabla se resumen algunas de las clases de celdas más comunes, mostrando características principales como lo son: la temperatura de operación, el tipo de electrolito, el combustible empleado, el rango de potencia y su aplicación (Enrique, 2016); Entre los diferentes tipos de celdas se destacan: las PEMFC (Polimer Electrolyte Membrane Fuel cell), DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), AFC (Alkaline Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) y las SOFC (Solid Oxide Fuel Cell).

Tabla 1. Tipos de celda de combustible

	PEMFC	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temperatura [°C]	80	120	220	220	800	1000
Electrolito	Membrana polimérica	Membrana polimérica	Hidróxido de potasio(KOH)	Ácido fosfórico	Carbonato de Li/K fundido	Oxido solido cerámico
Combustible	H ₂ , O ₂	Etanol, metanol	H ₂	H ₂ , gas natural	H ₂ , gas natural	H ₂ , gas natural
Potencia	250kw	100kw	100kw	1 MW	1 MW	1 MW
Aplicación	Portátil, móvil	Portátil, móvil	Espacial, submarino	Pequeñas plantas de potencia	Plantas de potencia	Plantas de potencia

Fuente: Tomado de (Barbir, 2013).

La tabla anterior muestra que las celdas SOFC son las que poseen el mayor rango de temperatura de funcionamiento, lo que las hace beneficiosas en aplicaciones de celdas estacionarias, donde tienen la ventaja de acoplarse a sistemas de plantas de cogeneración, en donde hay presencia de gas natural y alta temperatura, de manera que en el conjunto SOFC- Sistema cogenerado se obtienen notables eficiencias (Delgado, 2017). Otra Ventaja de las celdas SOFC, es que presentan una mayor flexibilidad en cuanto al combustible que pueden emplear. Así, en principio, pueden ser utilizados algunos hidrocarburos, alcoholes como combustibles, y funcionar con gas natural e inclusive CO (monóxido de carbono).

Las celdas AFC, PAFC y MCFC, son consideradas celdas de combustible que trabajan a alta temperatura, en su mayoría contienen un electrolito de tipo sólido, producen alta potencia, tienen la ventaja de consumir dos tipos diferentes de combustible como lo es el hidrogeno puro o Gas Natural, su tiempo de vida útil es amplio y una cualidad a destacar, es que estas no tienen catalizadores de platino, de manera que se reducen los costes, al mismo tiempo que sus electrodos sufren poca corrosión y se utilizan en aplicaciones estacionarias.

Otro tipo de celdas, son las DMFC (Direct Metanol Fuel cell), funcionan empleando metanol como combustible, operan a baja temperatura (120°C), su electrolito se compone por una membrana polimérica y contiene platino en sus electrodos; otra de sus cualidades es que son portables, de manera que se las puede emplear en pequeños dispositivos eléctricos como los teléfonos móviles. Por último, debido al

combustible que manejan, estos dispositivos emiten pequeños niveles de CO_2 (Sajure & Kachare, 2016).

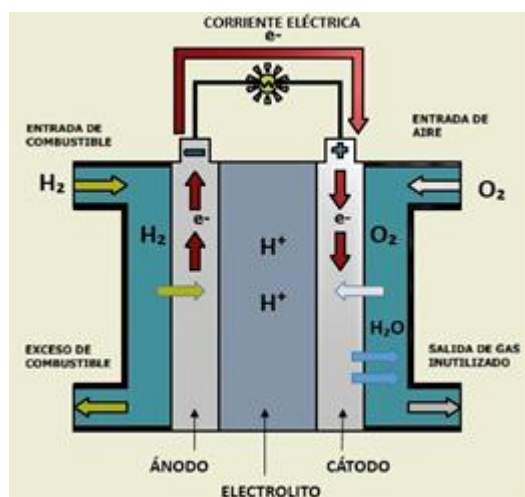
Las celdas tipo PEM funcionan con el menor rango de temperatura, generalmente $< 80^\circ\text{C}$. Se alimentan con gas hidrogeno y oxigeno de manera que sus productos son: vapor de agua, energía y cero agentes contaminantes. Son dispositivos portátiles y están presentes en aplicaciones móviles. El catalizador de platino presente en los electrodos es uno de sus inconvenientes, posee un alto costo debido a que es escaso en la naturaleza. Por otra parte, se necesita mucha energía produciendo hidrogeno para la alimentación de este tipo de celdas.

Celdas de combustible tipo PEMFC

Es un tipo de celda de combustible que convierte energía química en energía eléctrica (CD), a partir de dos gases reactantes, hidrogeno y oxígeno, obteniéndose agua pura, calor y un potencial entre sus electrodos. Esta clase de celda se caracteriza por contener un par de electrodos de platino y entre ellos, una membrana polimérica de Nafion R (Dupont). Debido al uso de esta membrana polimérica en su interior se le da el nombre de PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell).

En la Figura 3, se muestra el esquema básico de una celda tipo PEMFC mostrando el flujo de gases y el movimiento de iones y electrones en los componentes de la celda.

Fig. 3. Esquema simplificado celda de combustible con membrana de intercambio protónico



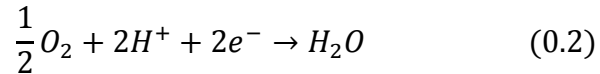
Fuente: Tomado de (Hernandez & Martinez, 2011).

Las reacciones electroquímicas en la celda de combustible ocurren simultáneamente en ambos lados de la membrana, el ánodo y el cátodo, y se exponen a continuación:

En el ánodo:



En el cátodo:



Reacción global:



Principio del funcionamiento básico de una celda tipo PEMFC:

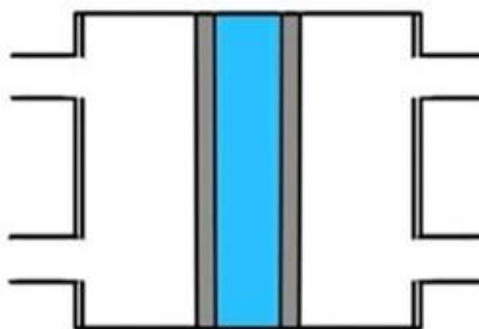
Se sabe que una molécula se compone de átomos, estos a su vez se componen de un núcleo en el cual se encuentran los protones y neutrones; y en la periferia del núcleo se encuentran los electrones (Harry, 2003).

Ahora bien, teniendo claro lo anterior se debe mencionar que los elementos que se utilizaron para generar electricidad de forma limpia por medio de la celda fueron el hidrogeno y el oxígeno en estado gaseoso, los cuales en condiciones normales de presión y temperatura se comportan como di-hidrogeno y di-oxigeno respectivamente.

El di-hidrogeno es una molécula formada por dos átomos de hidrogeno y de la misma forma, el di-oxigeno es una molécula formada por dos átomos de oxigeno.

Posteriormente, en la Figura 4, se puede evidenciar el esquema simplificado de una PEMFC con algunas partes a destacar; primero se tiene el rectángulo de color azul en la parte central, el cual es denominado membrana. Este componente es de crucial importancia en la celda y su principal función es el de permitir el paso de protones e impedir el paso de electrones.

Fig. 4. Esquema Simplificado de una PEMFC



Fuente: tomado de <https://www.youtube.com/watch?v=qTlirPZVEEE>.

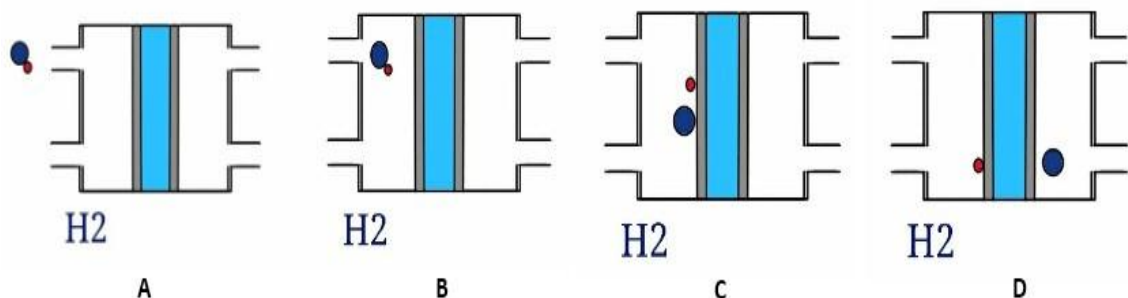
A los lados del rectángulo azul se observan dos franjas delgadas de color gris, estas franjas llevan por nombre electrodos y tienen dos funciones fundamentales; la primera es separar la molécula de di-oxígeno en dos átomos de oxígeno y de la misma manera separar la molécula de di-hidrogeno en dos átomos de hidrogeno, seguido de catalizar o favorecer el rompimiento del átomo de hidrogeno para obtener protones y electrones. La segunda función de los electrodos es coleccionar y conducir los electrones de hidrogeno generados durante el proceso de funcionamiento.

Finalizando la descripción, se tiene en cada lado de la celda una cámara de almacenamiento de gas, la del lado izquierdo se denomina cámara anódica y su función principal es contener hidrogeno; ahora bien, la del lado derecho tendrá el nombre de cámara catódica y es empleada para almacenar oxigeno.

En este momento cabe recordar dos definiciones importantes, el ánodo es un electrodo con carga negativa en el que se produce una reacción de oxidación mediante la cual un material que pierde electrones incrementa su estado de oxidación. El cátodo es un electrodo con carga positiva que sufre una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.

Continuando con la explicación, en la Figura 5, se puede evidenciar la reacción de oxidación del hidrogeno o dicho en otras palabras, el proceso mediante el cual un átomo de hidrogeno pierde un electrón (Cabildo, 2013).

Fig. 5. Funcionamiento simplificado oxidación hidrogeno. [A] Átomo de hidrogeno. [B] Átomo de hidrogeno en contacto con el electrodo. [C] Protón y electrón de hidrogeno. [D] Protón y electrón de hidrogeno separados por la membrana.

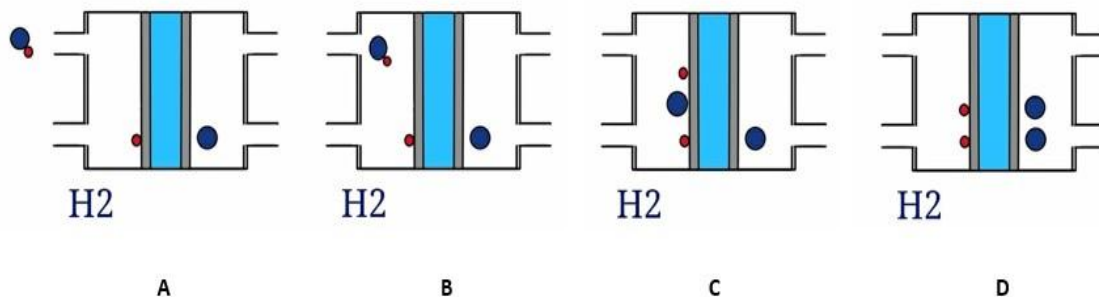


Fuente: adaptado de: <https://www.youtube.com/watch?v=qTlirPZVEEE>.

En la sección A de la Figura 5, se muestra un átomo de hidrogeno el cual se compone básicamente de un protón y un electrón. En la sección B el átomo de hidrogeno entra en contacto con el electrodo el cual facilita la separación del electrón de su núcleo, tal como se evidencia en la sección C. Finalmente en la sección D, se observa que el protón de hidrogeno ha pasado de la cámara anódica a la cámara catódica a través de la membrana, mientras que el electrón permanece en la cámara anódica debido a que la membrana no permite su paso.

Si un segundo átomo de hidrogeno recorre el proceso descrito anteriormente se obtiene un esquema similar al de la Figura 6; un aspecto a resaltar de este grafico es la sección D, la cual sugiere un patrón de ordenamiento de los átomos, teniendo al lado izquierdo de la membrana una acumulación de electrones y del lado derecho una acumulación de protones.

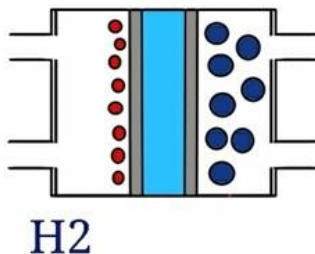
Fig. 6. Funcionamiento simplificado oxidación hidrogeno. [A] Átomo de hidrogeno. [B] Átomo de hidrogeno en contacto con el electrodo. [C] Protón y electrón de hidrogeno. [D] Protón y electrón de hidrogeno separados por la membrana.



Fuente: Adaptado de: <https://www.youtube.com/watch?v=qTlirPZVEEE>.

Reforzando lo expuesto anteriormente, después de que en múltiples átomos de hidrogeno ocurrió el proceso de oxidación, se obtiene lo representado en la Figura 7. En ella se evidencia claramente la disposición de los electrones al lado izquierdo de la membrana y de los protones al lado derecho, generando así una fuerza de atracción entre los mismos.

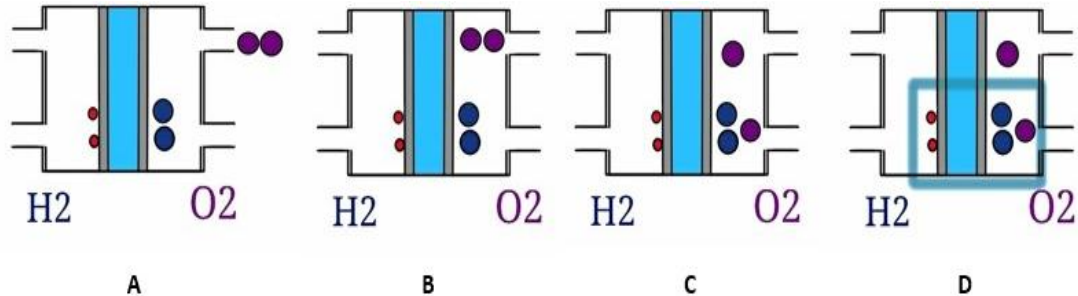
Fig. 7. Oxidación del hidrogeno para múltiples átomos.



Fuente: Adaptado de: <https://www.youtube.com/watch?v=qTlirPZVEEE>.

Reanudando la explicación, se enfatizó en la cámara catódica de la celda y en especial, la función del oxígeno dentro del proceso. En la Figura 8 se puede detallar cuatro secciones que se describen a continuación; en la primera sección denominada con la letra A, se tienen dos átomos de hidrogeno separados por la membrana y una molécula de di-oxigeno; en la sección B, la molécula de di-oxigeno ha entrado en la celda y empieza a reaccionar cuando entra en contacto con el electrodo; en la sección C se muestra como se separa la molécula de di-oxigeno en dos átomos de oxigeno, dando paso a la formación estructural de una molécula de agua al entrar en contacto con los dos protones de hidrogeno como se indica en un marco de color azul en la sección D. Lo único faltante para la formación de la molécula de agua es un camino para que los electrones de hidrogeno puedan llegar del lado anódico de la celda al lado catódico.

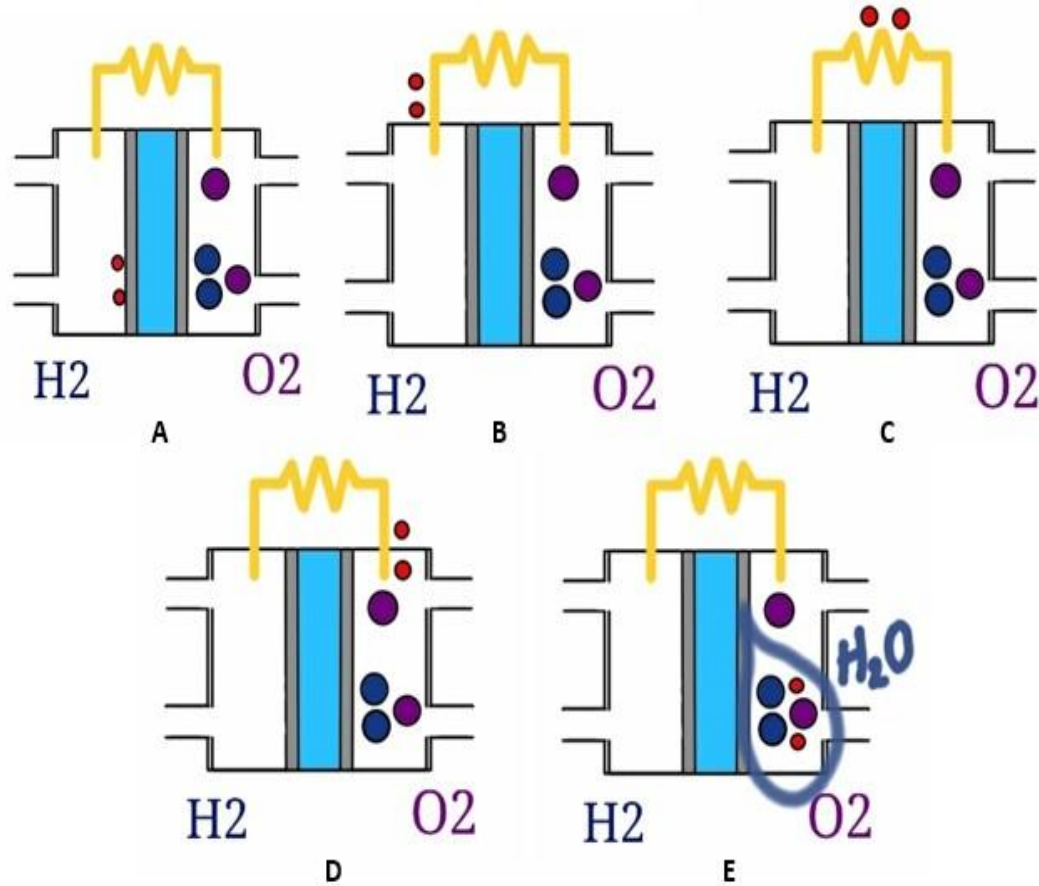
Fig. 8. Proceso de reducción del oxígeno en el funcionamiento de una PEMFC. [A] Molécula de di-oxígeno. [B] Molécula de di-oxígeno en contacto con el electrodo. [C] Átomo de oxígeno en contacto con los protones de hidrogeno. [D] Formación estructural molécula



Fuente: Adaptado de: <https://www.youtube.com/watch?v=qTlirPZVEEE>.

Para que los electrones de hidrogeno puedan llegar hasta la cámara catódica es necesario unir los electrodos a través de un contacto eléctrico, que para fines prácticos fue representado como una resistencia eléctrica. En la Figura 9, la cual se compone de cinco secciones, se evidencia el efecto que tiene en la celda cuando se conecta un circuito externo; En la sección A, se crea un camino para que los electrones de hidrogeno puedan viajar a través de una resistencia; en las secciones B,C y D se ejemplifica el movimiento de los electrones a través de la resistencia; finalmente en E, es posible apreciar la formación de una molécula de agua dejando como producto electricidad (flujo de electrones) y cero agentes contaminantes.

Fig. 9. Efecto de un circuito externo en el funcionamiento de una PEMFC. [A] Conexión resistencia externa. [B] Movimiento de electrones. [C] Movimiento de electrones. [D] Movimiento de electrones. [E] Formación molécula de agua.



Fuente: Adaptado de: <https://www.youtube.com/watch?v=qTlirPZVEEE>.

Ensamble de Membrana electrodos (MEA)

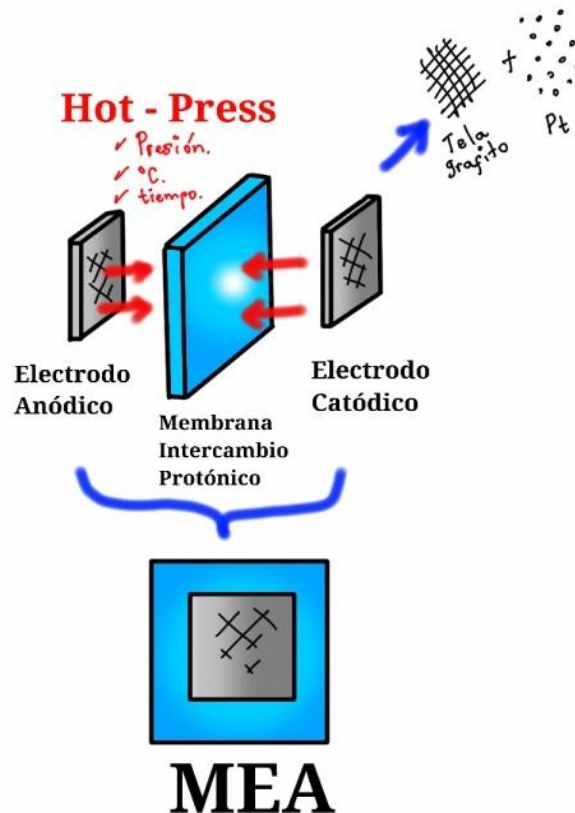
En cuanto a la membrana y los electrodos, es pertinente introducir como se realizó el ensamble entre estos, puesto que, existen múltiples variables que pueden afectar el desempeño funcional de una PEMFC referentes al ensamble membrana-electrodos.

Si se observa la Figura 10, en la parte superior es posible detallar en color azul la membrana y en color gris los electrodos; La membrana es conocida formalmente como membrana de intercambio protónico debido a su función de permitir el paso de protones a través de la misma y básicamente tiene la textura de una delgada lamina plástica transparente. Los electrodos se componen de una tela de grafito

como se ve en el costado superior derecho, más un agente catalizador que generalmente es el platino.

Por su elevado costo, la comunidad científica realiza diversas investigaciones para poder encontrar alternativas viables al uso del platino y su concentración, ya que esto favorecería a reducir costos en el valor de producción de celdas tipo PEM y beneficiaría la comercialización en gran escala de esta tecnología.

Fig. 10. Efecto de un circuito externo en el funcionamiento de una PEMFC.



Fuente: Adaptado de: <https://www.youtube.com/watch?v=qTlirPZVEEE>.

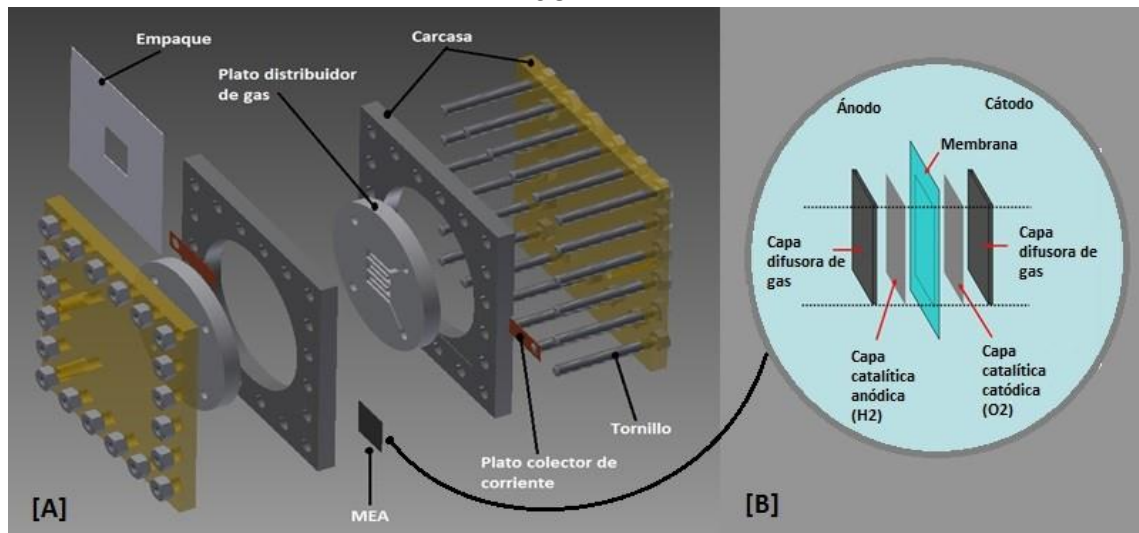
Retomando la Figura 10, la técnica con la cual se efectuó el ensamble entre la membrana y los electrodos se denomina Hot-Press o prensado en caliente; esta técnica se detalla más adelante, concretamente permite aplicar presión y temperatura por un tiempo determinado al ensamble membrana electrodos, uniendo tal como lo muestran las flechas rojas en la figura, el electrodo anódico y el electrodo catódico a la membrana de intercambio protónico; en la figura también se detalla la vista del MEA (Membrane Electrode Assembly o Ensamble Membrana Electrodos) desde un costado.

Dicho de otro modo, es como si se fuera a preparar un sandwich o emparedado en una sanduchera; el pan serían los electrodos y el jamón sería la membrana; la técnica de Hot-Press se aplicaría mediante la sanducera, la cual aplica presión al juntar todas las capas del sandwich cuando se cierra la tapa y temperatura por medio de su calefactor interno durante un tiempo determinado, el cual es informado a su usuario mediante un pequeño bombillo que se enciende cuando ha transcurrido el tiempo necesario para que el sandwich o MEA quede en perfectas condiciones.

Partes que componen una celda PEMFC:

En la Figura 11 se puede observar una imagen más detallada que describe las partes que conforman una PEMFC, estas se detallan a continuación según (Hernandez & Martinez, 2011) señalando los materiales más comunes y métodos de construcción:

Fig. 11. Partes principales de una PEMFC. [A] Vista generalizada de los componentes de una PEMFC. [B] Vista detallada de los elementos constituyentes del MEA.



Fuente: Tomado de (Hernandez & Martinez, 2011).

- A. Ensamble Membrana-Electrodo (Membrane Electrode Assembly, MEA):** Está formado por la membrana de intercambio protónico (electrolito) y dos electrodos que se ubican en cada lado de esta (ver Figura 11 [B]). A su vez, cada electrodo se compone de dos capas, la capa difusora de gas y la capa catalítica. A continuación, se describe cada una de las partes que componen el MEA:

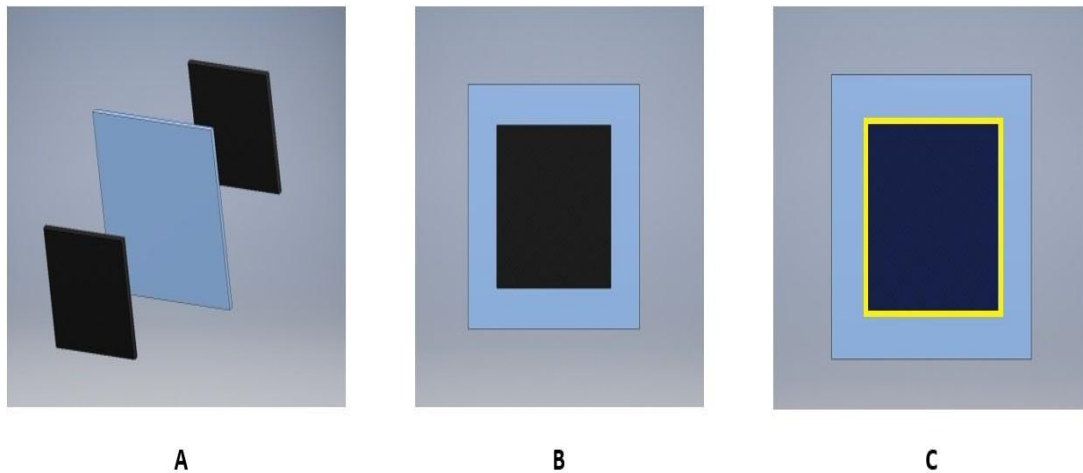
- a. **Capa difusora de gas:** Se encarga de distribuir uniformemente los gases que se introducen a la celda, y de propagarlos uniformemente sobre la capa catalítica. Además, se encarga de conducir los electrones generados en la capa catalítica y de llevarlos a los platos distribuidores de gas. Se fabrica generalmente a partir de tela porosa de grafito.
- b. **Capa catalítica:** En esta capa ocurre la reacción electroquímica de los gases reactantes lo cual permite separar las moléculas en sus constituyentes primarios. Debido a esta reacción, en el lado anódico del MEA (lado izquierdo de la Figura 11 [B]) se generan electrones y protones del gas combustible (hidrogeno), mientras que en el lado derecho del MEA se generan iones del gas oxidante (oxígeno, aire). La capa catalítica se encuentra ubicada en ambos lados de la membrana y básicamente es una tinta elaborada a partir de Nafion líquido, alcohol isopropílico y una solución de platino y carbón.
- c. **Membrana de intercambio protónico:** La membrana de intercambio protónico también conocida como electrolito tiene la función básica de permitir únicamente el flujo de los protones del lado anódico del MEA hacia el lado catódico del mismo, manteniendo separados los gases reactantes anteriormente mencionados. Comúnmente se usa polímeros perforados como el Nafion en forma laminar.

La capa catalítica se deposita sobre la capa difusora utilizando el método de serigrafía o goteo, que en su forma más básica consiste en aplicar una película de material mediante un pincel; al realizar esta deposición se obtiene el electrodo.

Para ensamblar el MEA, se acopla la membrana de intercambio protónico y los electrodos mediante prensado en caliente (Hot-Press) de acuerdo a condiciones de temperatura, presión y tiempo de prensado establecidas en la literatura (Hernandez & Martinez, 2011).

Finalmente, el área común entre los electrodos y la membrana de Nafion se conoce como zona activa o área activa, tal como se muestra en la Figura 11 [C]), donde se puede observar de color azul resaltado dentro del marco amarillo, el área que correspondería al electrodo y que para éste caso sería la misma área común entre la membrana y los electrodos; el área de la zona activa es fundamental para realizar la caracterización eléctrica Figura 12.

Fig. 12. Detalle de zona común. [A] Vista en ángulo de los componentes del MEA. [B] Vista frontal de los elementos constituyentes del MEA. [C] Demarcación en color azul resaltado dentro de un marco amarillo del área común entre la membrana y los electrodos.



Fuente: Tomado de (Hernandez & Martinez, 2011).

- B. Platos distribuidores de gases:** Tienen dos funciones básicas; la primera es conducir los electrones generados en el electrodo anódico, de modo que es necesario que el material a trabajar sea un buen conductor eléctrico.

La segunda función de los platos es distribuir los gases reactantes en la zona activa del MEA (Ver Figura 11, [C]), para lo cual fue necesario desarrollar unos canales con características determinadas, por los cuales fluyeron los gases reactantes (hidrogeno y oxigeno).

Resumiendo lo anterior, estos platos deben poseer las siguientes características: altamente conductores eléctricos y térmicos, muy estables en medios ácidos, no permeables a los gases, livianos, delgados, fuertes y de fácil manejo para el maquinado; de modo que, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos para su elaboración:

- **Material a trabajar y preparación:** De acuerdo a la revisión bibliográfica el material más adecuado para elaborar los platos distribuidores de gas fue el grafito, ya que, aunque es frágil y puede ser un poco difícil de maquinar, ofrece una serie de propiedades deseables como material para celdas de combustible con canales de flujo.

La estructura del carbono es estable por lo que es resistente a la corrosión en las condiciones hostiles de funcionamiento; ofrece una conducción eléctrica favorable, lo cual es importante para el funcionamiento apropiado del plato como componente de captación de corriente; además, el grafito tiene una baja densidad y por lo tanto no agrega demasiado peso al ensamble general.

- **Disposición y tamaño de los canales de flujo:** En cuanto al estudio paramétrico del diseño de los canales, se han desarrollado varias disposiciones, cada una con determinadas características que por lo general se estudian en CFD (Computational Fluid Dynamics) o herramientas computacionales de dinámica de fluidos, con el fin de obtener los patrones de operación y así tener la posibilidad de comparar entre si y analizar el comportamiento de las placas (Jaramillo & Ocampo, 2013).

De acuerdo con (Hernandez & Martinez, 2011) el canal tipo serpentín simple es el más común para campos de flujo de áreas pequeñas, ya que asegura que el gas pase por toda el área entera del serpentín con suficiente velocidad para empujar el agua condensada en el canal a la salida del campo de flujo, aunque la concentración de los gases reactantes disminuya a lo largo del mismo debido a la fricción con las paredes del canal y a las vueltas presentes en su trayectoria.

Teniendo en cuenta que los platos distribuidores de gas son considerados una mitad de un plato bipolar que es usado en los ensambles tipo stack, (Jaramillo & Ocampo, 2013) argumenta que las mediciones registradas con flujo constante de gases reactivos, muestran que la PEMFC usando las placas bipolares con disposición en serpentín produce magnitudes de voltaje que triplican a las magnitudes obtenidas cuando se utiliza las placas con disposición en caracol.

Respecto al tamaño de los canales de flujo, (Hernandez & Martinez, 2011) manifiesta que los canales anchos permiten un mayor contacto de los gases con la capa de catalizador, tienen menos caída de presión y permiten una extracción de agua más eficiente. Sin embargo, si los canales son demasiado anchos, no habrá suficiente soporte para la celda. Ahora bien, si la separación entre los canales de flujo es demasiado grande beneficia la conductividad eléctrica de las placas, pero reduce el área expuesta a los reactivos y promueve la acumulación de agua.

Eventualmente (Hernandez & Martinez, 2011) argumenta que las simulaciones computacionales han demostrado que las dimensiones optimas del canal para celdas de combustible son: 1.5 x 1.5 x 0.5 mm para la profundidad del canal, ancho de canal y la separación entre los canales respectivamente.

Otros resultados de trabajos de optimización en los canales tipo serpentín simple han revelado que los rangos preferentes para el dimensionamiento del canal son: de 1.14 a 1.4 mm para el ancho del canal, de 0.89 a 1.4 mm para la separación entre canales y de 1.02 a 2.04 mm para la profundidad del canal (Hernandez & Martinez, 2011)

Ahora bien, (Elsayed, Walaa, A.A, M.M., & K.M., 2012) exponen que el uso de múltiples canales en configuración serpentín incrementan el área de contacto con la superficie del electrodo reduciendo al mismo tiempo la caída de presión; de modo que teniendo en cuenta esta información, se decidió trabajar con dos canales en paralelo en el diseño del plato distribuidor de gas.

- C.** Platos colectores de corriente: Estos platos se fabrican a partir de un material conductor (Ver Figura 11, [A]), generalmente laminas cobre.

Su principal función es conducir los electrones y llevarlos a través de un circuito externo, finalmente mediante una herramienta de corte se da la forma deseada a esta lamina.

- D.** Carcasa, empaques y sellos: La carcasa les brinda soporte a las anteriores estructuras y permite el correcto funcionamiento de la PEMFC Ver Figura 11, [A]).

Esta carcasa generalmente se fabrica a partir de un metal como el aluminio y se le da forma mediante una maquina fresadora, además, está acompañada de empaques y sellos elaborados de silicona comercial que impermeabilizan el sistema del exterior.

- E.** Resistencia de carga: Es el equivalente en resistencia eléctrica del circuito que se va a alimentar con la celda, se conecta directamente a los platos colectores de corriente y su función principal es la de formar un circuito eléctrico externo que se encargara de conducir los electrones generados en el lado anódico de la celda hacia el lado catódico de la misma, produciendo corriente eléctrica y agua como productos de la reacción general de funcionamiento.

La configuración anteriormente descrita es conocida como monocelda, el potencial obtenido en una monocelda es relativamente bajo, generalmente alrededor de 1 voltio, esto se puede evidenciar en las diferentes investigaciones tales como (Hu & Cao, 2016).

Para emplear una PEMFC como sistema de generación de energía se elabora un stack de monoceldas, el cual básicamente es un conjunto de monoceldas conectadas en serie y/o paralelo para obtener una mayor producción de potencia eléctrica.

Como aplicaciones prácticas se puede mencionar: el uso de un stack de PEMFC's que genera 30 W de potencia como componente principal de un sistema que alimenta un paquete de sensores remotos que han sido desarrollados por (Hsu, 2016); El diseño y construcción de un stack de PEMFC's que genera 870 W para alimentar un vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) para misiones de altitud con alrededor 10 km (Barreras, 2016).

Caracterización eléctrica en una celda PEMFC:

Respecto a la caracterización eléctrica, esta permite percatarse del estado en el que se encuentra la celda y se ejecutó con el fin de conocer la respuesta de la misma a diferentes condiciones de operación; la caracterización consiste en aplicar diferentes técnicas que permiten aislar fenómenos para después atribuirlos a diversas partes de la celda.

la técnica electroquímica estándar para caracterizar el funcionamiento de una celda de combustible se denomina curva de polarización, esta es un gráfico de voltaje contra densidad de corriente bajo determinadas condiciones de operación, las cuales son denominadas condiciones estándar en el ámbito químico (25 °C de temperatura y 1 atm de presión).

La densidad de corriente se expresa según (0.4); donde i es la densidad de corriente expresada en $[A/cm^2]$, I es la corriente generada expresada en $[A]$ y A es el área activa del MEA expresada en $[cm^2]$ (Ver Figura 11 [C]).

$$i = \frac{I}{A} \quad (0.4)$$

Según (Barbir, 2013), el potencial teórico de una celda de combustible tipo PEM operando a condiciones estándar es 1.23 V; ahora bien, los valores máximos de potencial registrados en la práctica son menores de 1 V; esto se explica debido a las pérdidas ocasionadas en el sistema.

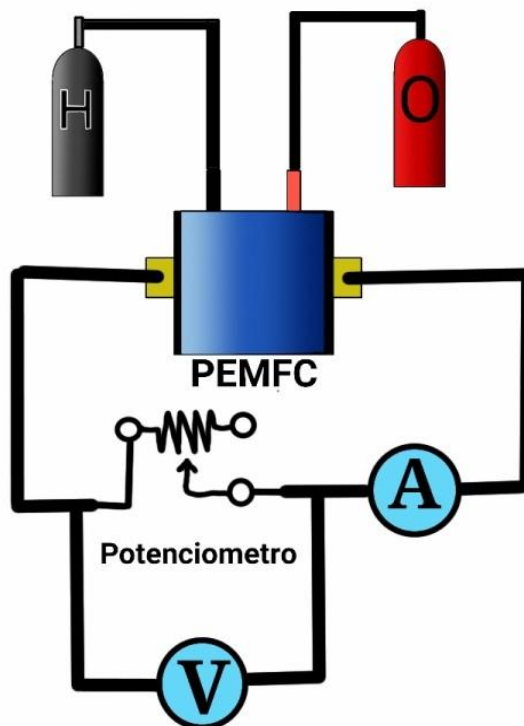
Las pérdidas ocasionadas en el sistema se pueden clasificar en cuatro ítems:

- **Pérdidas por activación:** La energía necesaria para que se produzca la separación de las moléculas y de los átomos causa este tipo de pérdidas.
- **Pérdidas óhmicas:** Como se presenta un flujo de electrones en medios conductores eléctricos, las caídas de potencial en las resistencias implícitas en el sistema causan este tipo de pérdidas.

- **Perdidas por concentración:** Estas pérdidas se refieren a taponamientos de zonas en el área activa, debidas al estancamiento de moléculas de agua en el MEA o envenenamiento de los electrodos mediante CO_2 .
- **Perdidas por crossover:** En la práctica, la membrana no puede aislar el paso de todos los electrones de hidrogeno ni tampoco el de todos los átomos de oxígeno, por lo que algunos átomos y moléculas atravesaran a zonas donde no corresponden, debido a esto se presentan perdidas en el sistema que corresponden a un mal funcionamiento.

En la Figura 13, se observa el montaje necesario para tomar una curva de polarización. Es pertinente recordar que el procedimiento consiste en graficar las medidas de Voltaje contra Densidad de Corriente (medidas de corriente divididas entre el área activa), tomadas mediante un voltímetro y un amperímetro respectivamente, realizando un barrido de lecturas a través de diferentes valores de resistencia mediante un potenciómetro, partiendo en resistencia cero o corto circuito y terminando en infinita o circuito abierto.

Fig. 13. Esquema de montaje para toma de curva de polarización

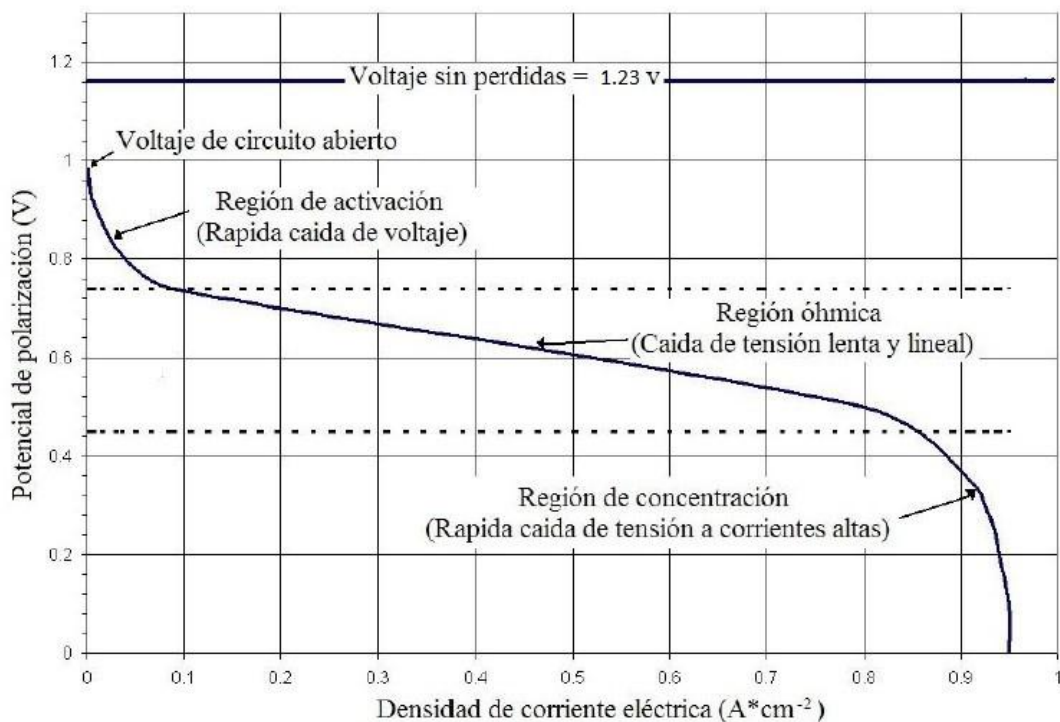


Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Posteriormente, se refiere a la Figura 14, ya que de acuerdo a (Hernandez & Martinez, 2011), en ella se evidencia el esquema de una curva de polarización en la que se pueden identificar tres zonas importantes, las cuales se describirán a continuación:

- **Región de Activación:** el voltaje de circuito abierto es menor que el teórico y al empezar la reacción se tiene una caída logarítmica de potencial.
- **Región Óhmica:** caída de potencial lenta y lineal causado por la resistencia óhmica del sistema.
- **Región de Concentración:** El potencial cae rápida y logarítmicamente respecto a la corriente debido a problemas de difusión (transporte de reactantes).

Fig. 14. Esquema de curva de polarización.



Fuente: Tomado de (Hernandez & Martinez, 2011).

Ahora bien, es importante garantizar que las condiciones de la celda para la caracterización siempre sean las mismas (temperatura, presión, humedad relativa, fuerza, flujo, etc.); ya que así se favorecerá la repetibilidad y la reproducibilidad de las medidas.

Se conoce que en la Universidad de Nariño se han desarrollado diversas investigaciones en el campo de las celdas de combustible como por ejemplo las Microbianas con el grupo de investigación en BIOELECTROQUIMICA; sin embargo, no se encuentran registros de investigaciones referentes a la temática de PEMFC, esto debido a razones como: falta de equipos especializados en la manipulación de materiales; carencia de insumos necesarios para la construcción de PEMFC debido a su elevado costo y dificultad de acceso; y complejidad en la temática de investigación lo cual hace necesario trabajar interdisciplinariamente en áreas como: Química e Ingeniería Electrónica.

1. METODOLOGIA

Para llevar a cabo la elaboración del prototipo de celda de combustible, se consideraron las siguientes restricciones:

- Construcción de un prototipo con los materiales disponibles en el Centro de Investigación de Materiales CIMA.
- Dimensionamiento de la celda a pequeños valores debido a la cantidad limitada de los reactivos y al elevado costo de los mismos, además de tener en cuenta una posible aplicación a dispositivos de baja potencia.
- Diseño con geometrías sencillas de manipular con la fresadora de control numérico marca MOSKI 2417, disponible en el laboratorio.

La metodología de este trabajo consta de tres partes: la primera consiste en las técnicas de activación (membrana de intercambio protónico) y elaboración de los componentes de la celda (platos distribuidores de gas, carcasa, etc.); La segunda parte consiste en la descripción del ensamble de la celda y la tercera parte es la sección dedicada al procedimiento de toma de pruebas eléctricas de la celda tipo PEM.

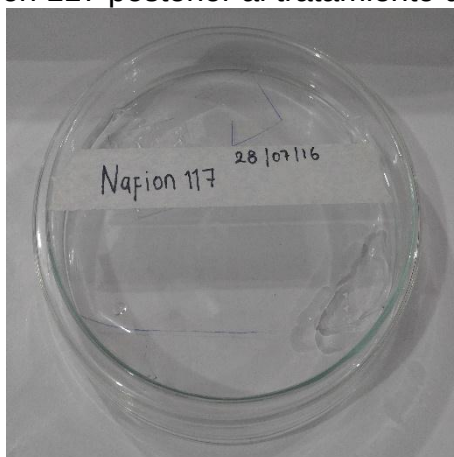
1.1. Elaboración del ensamble membrana - electrodos

Referente a la elaboración del ensamble membrana- electrodos, se empezó activando la membrana de Intercambio protónico con el fin de remover impurezas y minerales orgánicos, además de hidratar la misma. Este procedimiento se realizó con ayuda de personal de Química adscrito al laboratorio CIMA.

Para el presente proyecto se eligió trabajar con una lámina de Nafion 117 adquirida comercialmente, con un espesor de 183 μm . En la Figura 15 es posible observar la membrana después de aplicar el tratamiento de activación que según (Hernandez & Martinez, 2011) consiste en:

- I. Sumergir la membrana en un recipiente de vidrio que contenga peróxido de hidrogeno $H_2 O_2$ al 3 % durante 45 minutos.
- II. Enjuagar con agua des ionizada en ebullición durante 15 minutos.
- III. Colocar en una solución en ebullición de ácido sulfúrico 1 Molar durante 45 minutos.
- IV. Enjuagar de nuevo con agua destilada en ebullición por 15 minutos.
- V. Posteriormente almacenar en agua destilada.

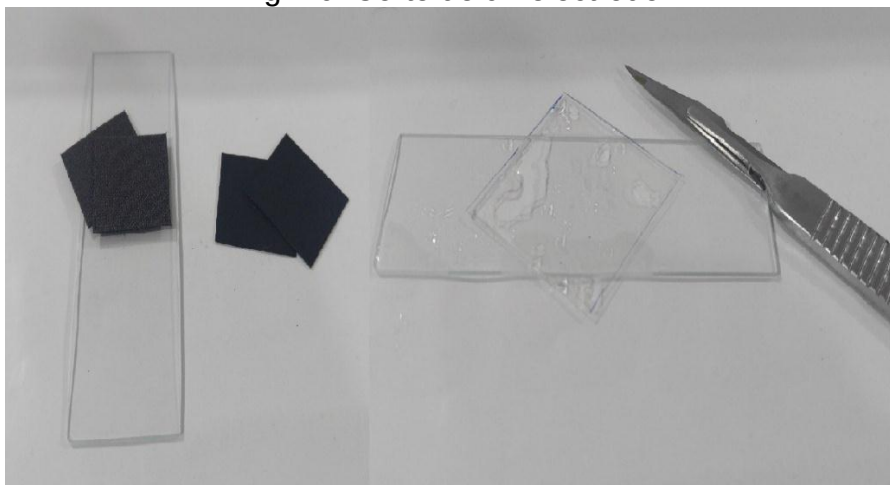
Fig. 15. Nafion 117 posterior al tratamiento de activación.



Fuente: Creación propia.

Una vez activada la membrana, se procedió a cortar una pieza de forma cuadrada con una dimensión de 3 cm de lado, luego se realiza el corte de los electrodos con el fin de obtener dos pedazos de forma cuadrada con una dimensión de 2 cm de lado, los electrodos a usar han sido adquiridos comercialmente y tienen una composición de 0.5 mg/cm^2 60 % de Platino en Carbón Vulcan. En la Figura 16 se observa la membrana y sus respectivos electrodos luego del proceso de corte.

Fig. 16. Corte de un electrodo.



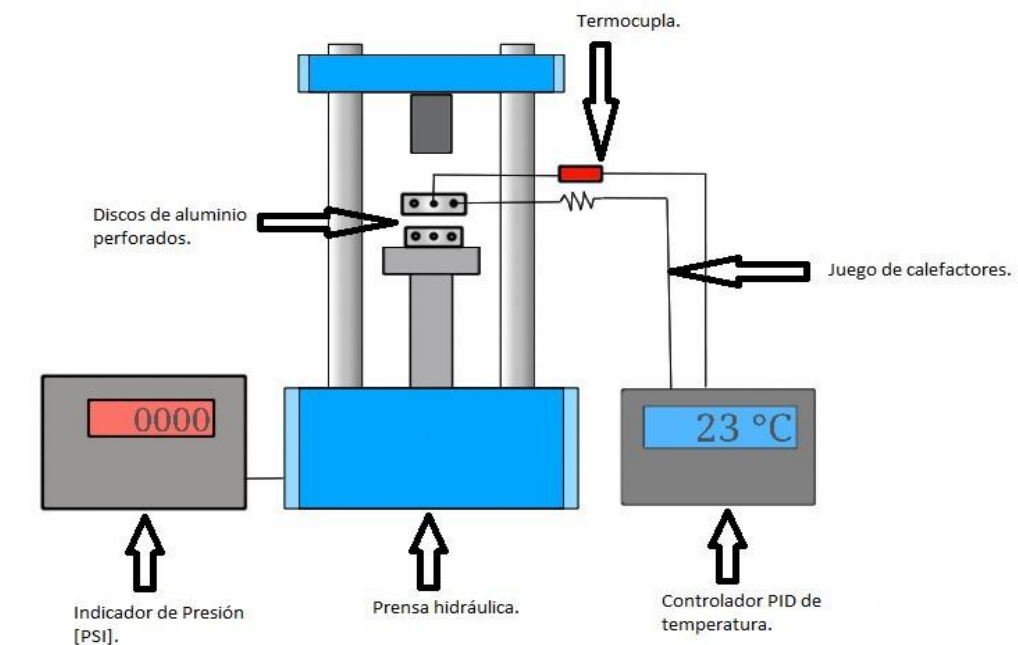
Fuente: Creación propia.

Posteriormente, se alinearon simétricamente en una configuración tipo “emparedado” siguiendo el diseño establecido en la Figura 8 [B], la membrana y sus respectivos electrodos, uno en cada lado, teniendo en cuenta la ubicación de la capa catalítica al momento de efectuar el ensamble, ya que esta quedó orientada hacia la membrana.

Para garantizar adherencia entre capas se aplicó una gota esparcida uniformemente de Nafion 117 solución marca *Aldrich R* a los electrodos en las capas catalíticas de acuerdo a lo expuesto por (Z. X., T. S., & J, 2006); finalmente se envolvió el MEA en papel aluminio con el fin de evitar dos posibles problemas: que se desplacen las capas al momento del prensado en caliente y que se adhieran los electrodos a los discos de aluminio.

Después, se empleó la técnica de prensado en caliente para el ensamble del MEA, para esto se diseñó un prototipo de Hot-Press que se puede observar en la Figura 17, de donde se destacan las siguientes partes: una prensa hidráulica con su respectivo sensor de presión e indicador; dos discos de aluminio perforados en los extremos, donde se introdujeron calefactores resistivos y dos termocuplas, con el fin de realizar el control de temperatura por medio de un controlador PID dispuesto para tal fin con su respectivo visualizador. Finalmente, en la Figura 18 es posible evidenciar el prototipo de Hot-Press utilizado.

Fig. 17. Diagrama esquemático de sistema Hot-press



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Fig. 18. Prototipo de Hot-Press utilizado para el ensamble del MEA



Fuente: Creación propia.

Continuando con el proceso de ensamblado, se obtuvieron de la literatura las condiciones necesarias para efectuar el prensado en caliente en un MEA compuesto por electrodos elaborados en tela de carbón (Carbon Cloth, CC), de modo que, según (Yuyun, Indriyati, & Achiar, 2012), los parámetros de temperatura, presión y tiempo de prensado se resumen en la Tabla 2

Considerando el área de la zona activa, también denominada área activa, se realizan los siguientes cálculos, partiendo de la Ecuación 1.1 que relaciona la presión, la fuerza y el área; para determinar la presión que se tuvo que aplicar en el sistema, teniendo en cuenta las dimensiones de nuestra área activa (Ver Figura 9 [C]), que fue de 4 cm^2

$$P \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] = \frac{F[\text{kgf}]}{A[\text{cm}^2]} \quad (1.1)$$

$$F = P * A \quad (1.2)$$

$$F = 20 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 4 \text{ cm}^2 \quad (1.3)$$

$$F = 80 \text{ kgf} = 176 \text{ lbf} \quad (1.4)$$

Posteriormente, se introdujo el MEA envuelto en papel aluminio en medio de los discos del Hot-Press, los cuales fueron precalentados a 120°C para iniciar con el

proceso de prensado en caliente estableciendo la presión a efectuar, en este caso 176 lbf durante 5 minutos.

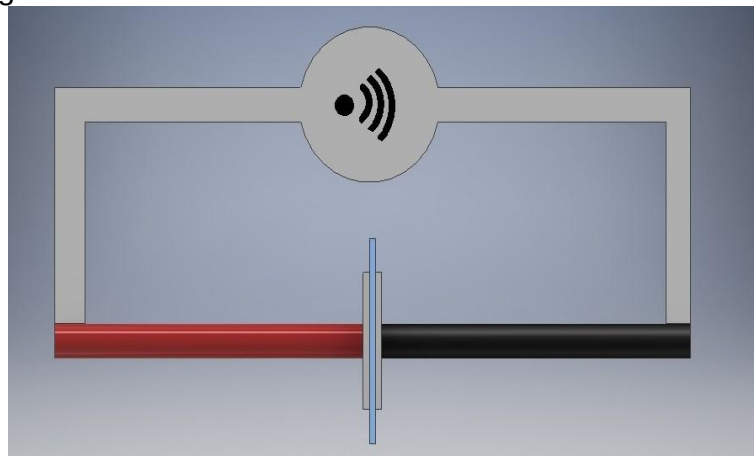
Tabla 2. Parámetros para ensamble del MEA

PARAMETRO	VALOR
TEMPERATURA (°C)	120
PRESION (kg/cm ²)	20
TTIEMPO (s)	300

Fuente: Creación propia.

En esta etapa, se realizó una breve medida de continuidad entre los electrodos para verificar que no exista continuidad entre estos, esto se hizo siguiendo el procedimiento indicado en la Figura 19, en la cual se puede observar un medidor de continuidad que ha conectado sus puntas en cada uno de los electrodos; si existe continuidad se puede asumir que las condiciones del Hot-Press han sido muy agresivas, lo cual llevaría a un replanteo, pero si no existe continuidad se concluye que las condiciones son las apropiadas.

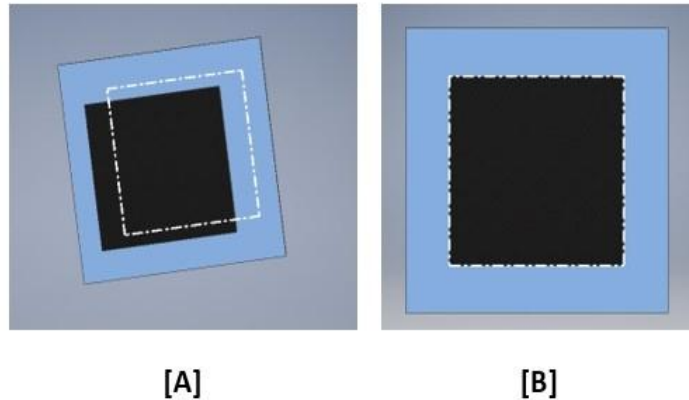
Fig. 19. Procedimiento de medición de continuidad al MEA



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Ahora bien, se debe garantizar simetría y correspondencia entre electrodos durante el prensado en caliente, con el fin de propiciar una adecuada distribución de los gases reactantes; en la Figura 20; en la sección A se puede ver un MEA desfasado, que muestra un electrodo posterior en punteado blanco y un electrodo frontal en color negro, de los cuales se deduce que no ha habido concordancia con sus ubicaciones, concordancia que si se presenta en la sección [B].

Fig. 20. Problema de desfase de electrodos en el MEA. [A]. [B].



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

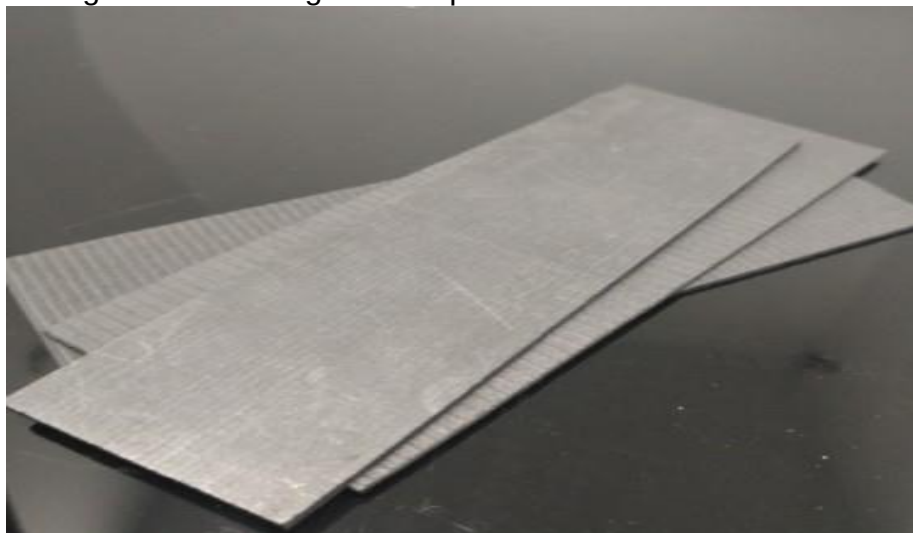
1.2. Proceso de ensamble del prototipo

Previo a la descripción de los pasos que se siguieron para efectuar el ensamble del prototipo, se describe el diseño para la elaboración de cada una de sus partes:

A. PLATOS DISTRIBUIDORES DE GASES:

Según los requerimientos vistos en el marco teórico, se decidió adquirir láminas de grafito de forma rectangular con dimensiones 100 mm de largo por 50 mm de ancho y 5 mm de grosor; el grafito adquirido comercialmente se muestra en la Figura 21 y sus especificaciones técnicas se resumen en la Tabla 3.

Fig. 21. Placa de grafito adquirida comercialmente



Fuente: Sitio virtual
<https://es.aliexpress.com/store/1944487?spm=a219c.12010108.100004.2.5e263101Nzs0rO>

Tabla 3. Propiedades placa de grafito comercial

PARAMETRO	
<i>Material</i>	Grafito
<i>Color</i>	Negro
PROPIEDAD	
<i>Densidad Aparente (g/cm³)</i>	>1,85
<i>Resistencia ($\mu\Omega m$)</i>	< 13
<i>Fuerza de compresión (MPa)</i>	>75
<i>Tamaño del grano (mm)</i>	0,043
<i>Pureza (%)</i>	99,95

Fuente: Sitio virtual
<https://es.aliexpress.com/store/1944487?spm=a219c.12010108.100004.2.5e263101Nzs0rO>

Debido a que las placas de grafito presentaron imperfectos superficiales y que sus dimensiones de fábrica dificultaron su manejo, fueron cortadas y pulidas dos placas cuadradas de 30 mm de lado por 4.5 mm de grosor las cuales fueron tomadas como base para el maquinado de los platos distribuidores de gas.

Continuando con el proceso, las herramientas que se utilizaron para la elaboración de los platos distribuidores de gas fueron:

- CNC marca MOSKI 2417.
- Fresa de 1 mm.
- Soportes de plástico PLA fabricados con impresión 3d.

Finalmente, tomando en cuenta el área disponible para el campo de flujo de gas que es de 4 cm² correspondiendo al tamaño de los electrodos; los beneficios de la configuración del flujo de gas tipo serpentín, según lo manifestado por (Elsayed, Walaa, A.A, M.M., & K.M., 2012) respecto a los múltiples canales de acceso y la herramienta disponible, se optó por dimensionar el campo de flujo como se indica en la Tabla 4.

Un plano del diseño final elaborado en software CAD se puede observar en la Figura 22, donde es posible apreciar la vista frontal del plato distribuidor de gas, que permite evidenciar el ancho del canal tanto como el ancho de la

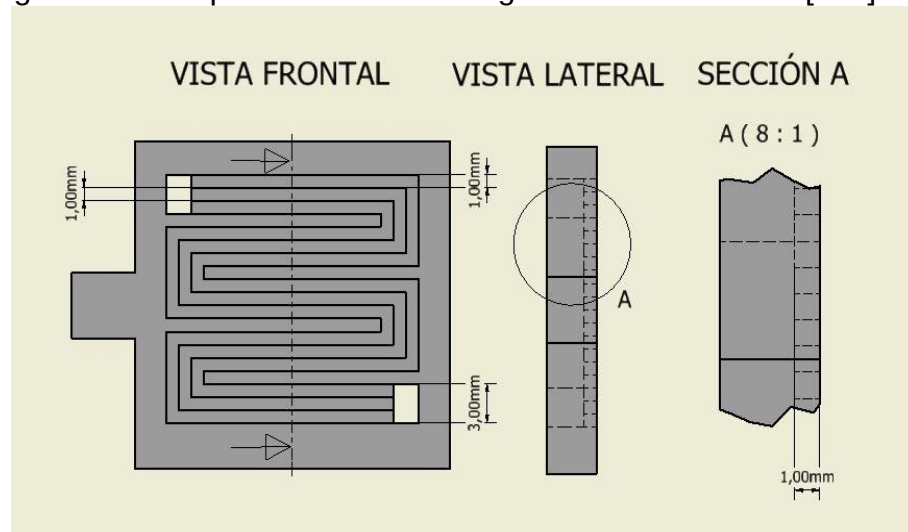
separación entre canales con una dimensión de 1 mm y una vista lateral del plato distribuidor del cual se ha extraído una sección A para revelar el tamaño de la profundidad del canal que es igual a 1 mm; además es posible evidenciar dos accesos de forma rectangular con dimensiones 2 x 3 mm al inicio y al final del serpentín, los cuales servirán de entrada y salida del gas reactante.

Tabla 4. Dimensiones canales de flujo

<i>CARACTERISTICAS</i>	<i>DIMENSIONES (mm)</i>
<i>Ancho del canal</i>	1
<i>Profundidad del canal</i>	1
<i>Separación entre canales</i>	1
<i>Longitud del serpentín</i>	100

Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Fig. 22. Planos plato distribuidor de gas. Dimensiones en [mm].



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

B. PLATOS COLECTORES DE CORRIENTE:

Generalmente los platos colectores de corriente se elaboran a partir de una lámina de cobre que según (Jaramillo & Ocampo, 2013) al recubrirla de níquel, mejoran sus propiedades conductoras tendiendo a elevar el voltaje de la celda.

Sin embargo, para este diseño se decidió cambiar la concepción de los platos colectores de corriente reduciéndolos a un cable de cobre de audífono, el cual se unió directamente al plato distribuidor de gas, por medio de una pequeña hendidura en una pestaña cuadrada de 5 mm de lado, que se puede observar en la Figura 22 en el lado izquierdo; Finalmente se aplicó pintura de plata para garantizar el contacto eléctrico.

La justificación de eliminar el plato distribuidor de gas es abaratar costos y simplificar el diseño sin afectar el desempeño eléctrico del prototipo, aprovechando la propiedad conductora del grafito la cual puede conducir todos los electrones captados al conductor de cobre.

C. CARCASA, EMPAQUES Y SELLOS:

Para la construcción de la carcasa se decidió emplear la técnica de impresión en 3D, mediante la impresora Freaks 3D, que se puede observar en la Figura 23. La impresión en 3D consiste en obtener una pieza de material plástico, generalmente de tipo PLA o ABS; las ventajas de utilizar una carcasa plástica en comparación a una carcasa metálica que generalmente es empleada en los diferentes prototipos de celdas, son: gran reducción de costos, precisión equivalente, facilidad de diseño y elaboración. Para desarrollar esta técnica se emplean los siguientes pasos:

- a) Diseñar en software CAD el modelo de la pieza a imprimir generando así un archivo (. STL).
- b) A partir del archivo anterior, mediante el software CURA 15.04, se obtiene el archivo (gcode). El cual fue empleado por la máquina para la creación del molde.

Fig. 23. Impresora Freaks 3D.

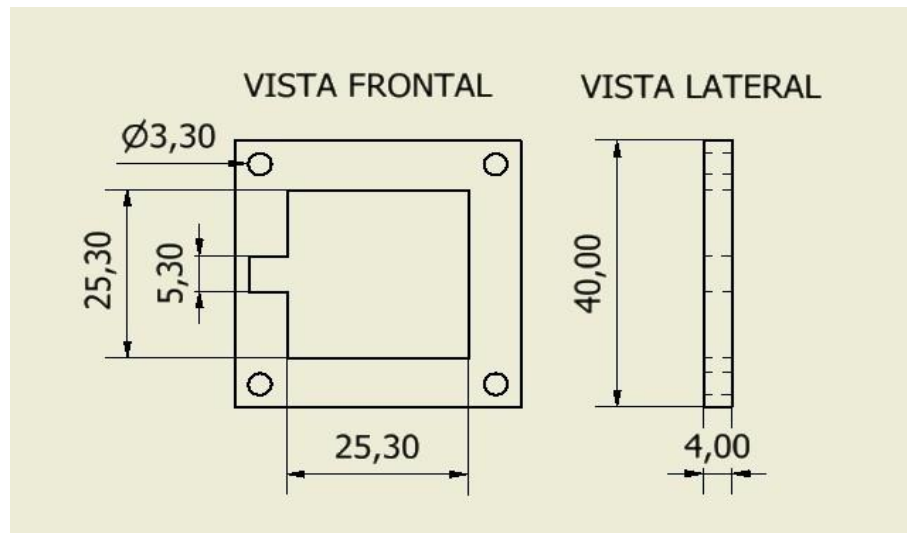


Fuente: <http://www.elecfreake.com/8228.html>.

Para elaborar la carcasa de la celda, fue necesario crear dos piezas plásticas. La primera, denominada pieza No. 1 tiene forma cuadrada con 40 mm de lado y 4 mm de grosor, se puede observar en la Figura 24 y tiene las siguientes funciones: sirve de soporte para el plato distribuidor de gas, para esto se diseñó un agujero cuadrado de 25.30 mm de lado en el que se incrustó el plato distribuidor de gas; además, tiene un pequeño acceso de forma cuadrada con 5.3 mm de lado, el cual sirvió para calzar la pestaña cuadrada del plato distribuidor de gas que se utilizó como acople con el cable como ya se había mencionado.

Finalmente, esta pieza se perforó en su contorno cuadrado con 4 agujeros equidistantes de 3.3 mm de diámetro, en los cuales se introdujeron tornillos M3 de 19.05 mm con el fin de ajustar las diferentes capas de la carcasa.

Fig. 24. Planos de la pieza No.1 de la carcasa plástica. Dimensiones en [mm].



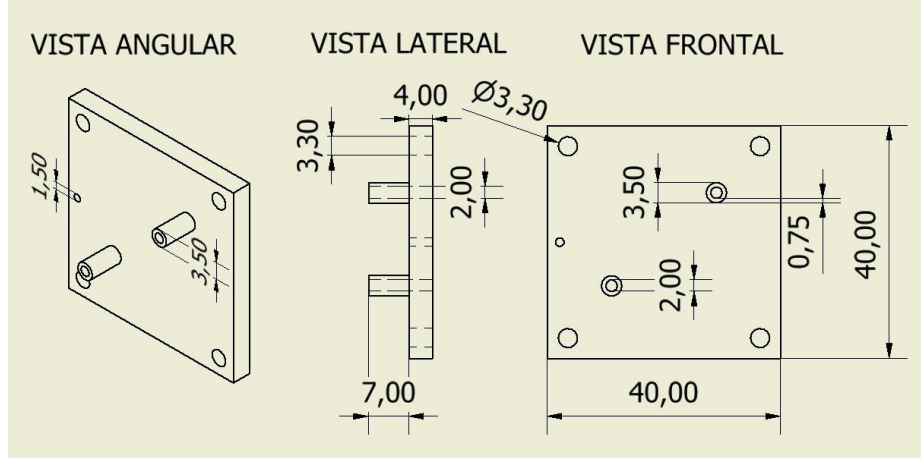
Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Continuando con la descripción de la carcasa, en la Figura 25 se observa la pieza No. 2, la cual tiene forma cuadrada con dimensiones 40 mm de lado por 4 mm de grosor. La función principal de esta pieza es servir de soporte externo y permitir la inyección de gases reactantes. Para esto, la pieza se maquinó con dos pequeños agujeros de 2 mm de diámetro acompañados de dos extrusiones cónicas de 7 mm de alto y 750 μ m de grosor, que permitieron conectar a presión las mangueras externas por donde ingresan los gases. Estos agujeros coincidieron exactamente con los accesos diseñados para el mismo fin en el plato distribuidor de gas permitiendo así el correcto flujo de los gases.

Finalmente, se diseñó en la pieza No. 2 un agujero con diámetro de 1.5 mm con el fin de tener un acceso para el cable de cobre.

Referente a los sellos, se decidió no utilizar ninguna pieza externa que se incluya entre capas ya que se presentaron fugas en el prototipo base cuando se utilizaron, de modo que se optó por elaborarlos con silicona líquida y distribuirlos entre capas a medida que se necesiten, enfocados a evitar las filtraciones de gases no deseadas.

Fig. 25. Planos de la pieza No.2 de la carcasa plástica. Dimensiones en [mm].



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

De acuerdo a la metodología expuesta por (Hernandez & Martinez, 2011), se adaptaron los siguientes pasos, con el objetivo de reducir las variables que puedan afectar el desempeño de la celda durante el ensamblado del mismo:

- Se prepararon todos los componentes de la celda de combustible, esto incluyó también los materiales y las herramientas que se utilizaron durante el ensamblado, como son: alcohol isopropílico, pinzas de laboratorio, algodón, papel, cinta teflón, llave de 8 mm, destornillador de estrella, tornillería en general, además del uso de bata y guantes de látex.
- Con el algodón y el alcohol isopropílico, se limpiaron cada uno de los componentes de la celda: cables de audífono, platos de grafito, carcasa plástica y tornillería en general.
- Se introdujeron tornillos M3 en la periferia de una pieza No. 2, con el fin de utilizarlos como guías durante el proceso de ensamble.
- Se colocaron los sellos en la pieza No.2, aplicando silicona en forma circular alrededor de los accesos de gases reactantes.
- Se introdujo un plato distribuidor de gas en una pieza No.1 sellando con silicona y una espátula las intersecciones entre ambas piezas.
- Se acopló un cable de audífono a la hendidura del plato distribuidor de gas del ensamble del numeral anterior, sellando con pintura de plata el contacto eléctrico previa limpieza del recubrimiento del cable.

- g. Se ensambló la pieza obtenida en el numeral 4 y la pieza obtenida en el numeral 6, teniendo en cuenta la disposición de los accesos para los gases reactantes y que los canales de flujo de gas queden orientados hacia el exterior; a este ensamble se le denominó Ensamble No.1.
- h. Se depositó el MEA en el ensamble anterior, en este caso no se tuvo en cuidado en determinar que electrodo es el anódico o el catódico debido a que los dos tuvieron la misma carga de platino.
- i. Ahora bien, al ensamble anterior se le acopló un segundo ensamble No.1 teniendo en cuenta que los sentidos de los canales de flujo de gas queden opuestos.
- j. Se instalaron todas las tuercas y arandelas respectivas.
- k. Se apretaron en forma cruzada las tuercas, teniendo en cuenta que se designó previamente a una persona para que realice el apriete tratando de garantizar que se había aplicado la misma fuerza en cada tuerca utilizando solo la fuerza de los dedos.

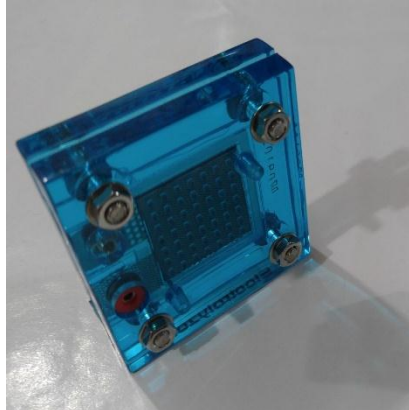
Una vez concluido el ensamble, la celda estuvo lista para las pruebas eléctricas experimentales.

1.3. Procedimiento toma de curva de polarización

La curva de polarización se realizó con la ayuda de los siguientes elementos:

- I. Electrolizador: Marca Horizon, adquirido comercialmente, se encarga de proporcionar hidrogeno a un flujo aproximado de 7 mL/min y oxígeno a un flujo 3.5 mL/min. Ambos a una presión de aproximadamente 1 psi, este se puede visualizar en la Figura 26.

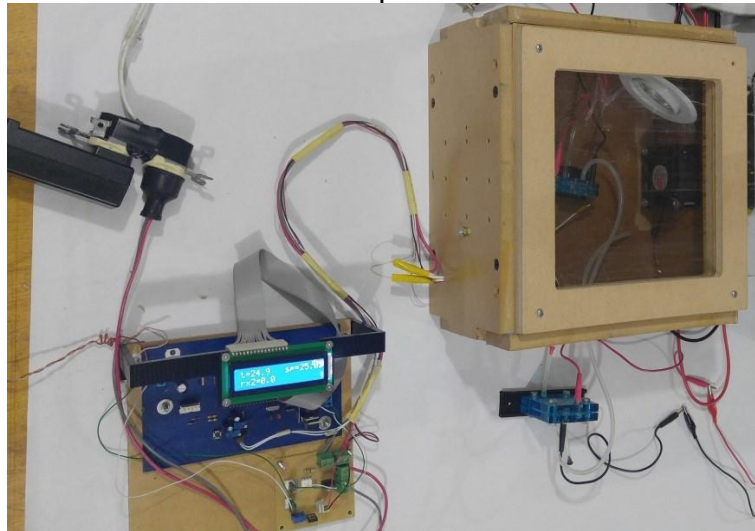
Fig. 26. Electrolizador marca Horizon



Fuente: Tienda virtual <https://www.fuelcellstore.com>.

- II. Nano multímetro: Marca Nacional Instruments, modelo USB-4065, con $6^{1/2}$ dígitos de resolución, permite efectuar el seguimiento al voltaje de la celda PEM con una excelente resolución.
- III. Incubadora: como lo indica la Figura 27, elaborada a partir de MDF, cuenta con un circuito de control tipo PID con pantalla de visualización, dos calefactores en tipo lámpara, un ventilador y una termocupla.

Fig. 27. Incubadora con su respectivo circuito de control.



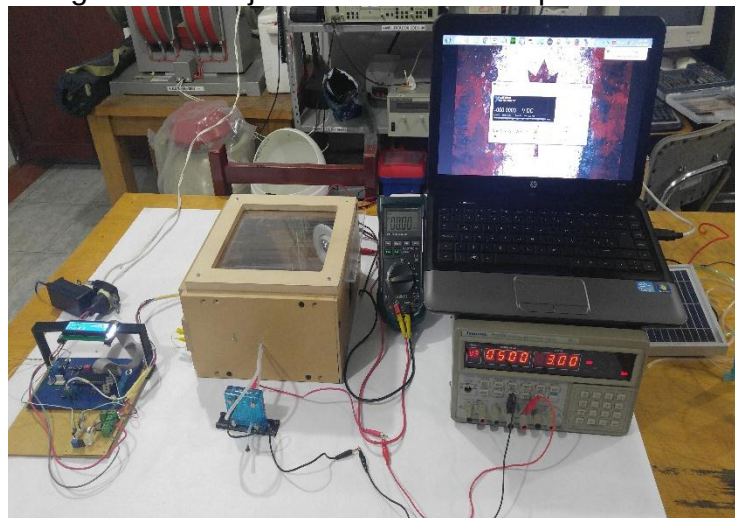
Fuente: Control PID. Creación propia.

- IV. Multímetro: Marca MASTECH, modelo MS 8268, utilizado para efectuar un seguimiento a la corriente de la celda.

- V. Fuente de voltaje: Marca TEKTRONIX, modelo PS 2520G, utilizada para alimentar el electrolizador con un voltaje de 3.3 V.
- VI. Computador portátil: Marca HP, modelo HP 450, utilizado para visualizar mediante el software de National Instruments, la medida del nano multímetro.
- VII. Conectores y tubos de conducción de gases.

En la Figura 28, se evidencia el montaje final utilizando los elementos anteriormente listados con el fin de efectuar la curva de polarización de la celda prototipo y una curva de polarización de una celda comercial, a fin de hacer una comparación entre estas y concluir que tan cerca se estuvo de igualar la densidad de potencia de una celda comercial.

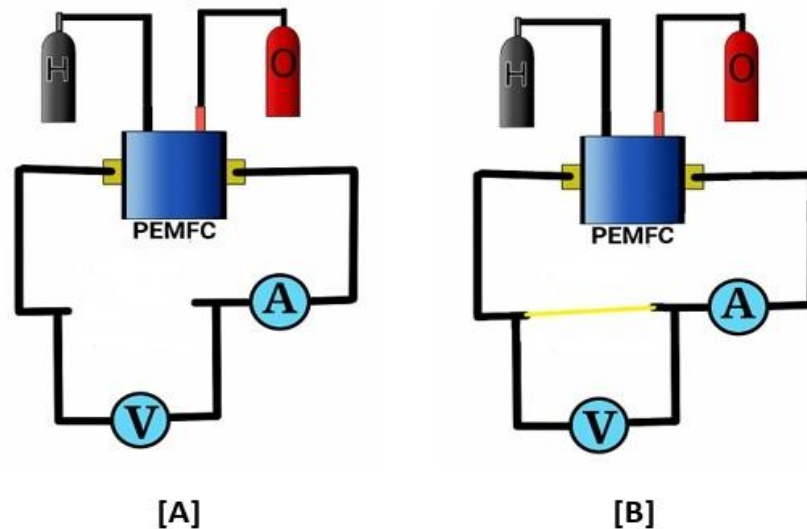
Fig. 28. Montaje toma de curva de polarización



Fuente: Creación propia.

La primera prueba eléctrica que se realizó para evidenciar el correcto funcionamiento de la celda, consistió en medir el potencial generado a circuito abierto y la corriente generada en corto circuito (0 V) de acuerdo al esquema de la Figura 29, secciones [A] y [B]. A ésta prueba se le suele denominar proceso de activación y se generalmente realizan múltiples repeticiones en un dispositivo diseñado para tal fin.

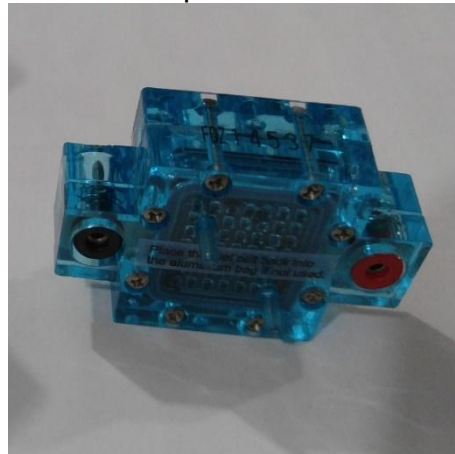
Fig. 29. Proceso de activación PEMFC. [A] Prueba eléctrica PEMFC circuito abierto. [B] Prueba eléctrica PEMFC corto circuito.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

La anterior prueba se realizó tanto a la celda prototipo como a la celda comercial tipo PEMFC marca Horizon que se puede mirar en la Figura 30, la cual fue tomada como referencia para contrastar los resultados en todas las pruebas eléctricas realizadas.

Fig. 30. Celda comercial tipo PEM tomada como referencia.



Fuente: Tienda virtual. <https://www.fuelcellstore.com>.

La segunda prueba eléctrica, referente a la curva de polarización se tomó siguiendo el esquema de la Figura 15 y de acuerdo a (Hernandez & Martinez, 2011) se adaptaron los siguientes pasos:

- a. Se proporcionó la alimentación de los gases reactantes a la celda.
- b. Se configuró un valor de resistencia de carga con ayuda de un multímetro, iniciando en el menor valor posible.
- c. Se esperó 3 minutos para que se estabilice la medida en el voltímetro y en el amperímetro.
- d. Se registró los datos obtenidos en el numeral anterior.
- e. Se incrementó el valor de resistencia de carga.
- f. Se procedió a repetir del numeral 3 al 5 hasta que se obtuvieron 40 datos representativos que definieron la forma de la curva de polarización.
- g. El procedimiento anterior se repitió tres veces y se promediaron los resultados con el fin de minimizar el error en las medidas.

2. RESULTADOS

Los resultados de este trabajo se pueden clasificar en cuatro partes:

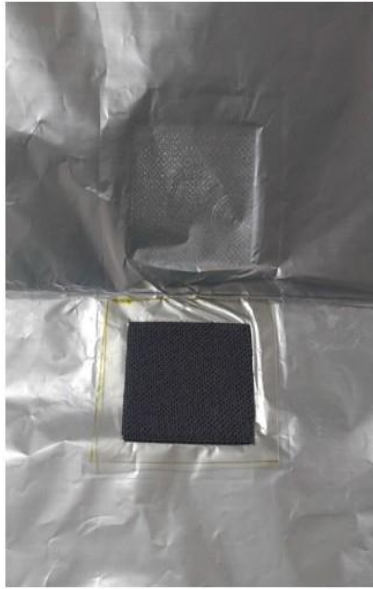
- La primera consistió en observar los resultados de los procesos de elaboración del MEA, de los platos distribuidores de gas y de las partes plásticas de la carcasa.
- La segunda parte consistió en la descripción del ensamble de la celda.
- La tercera parte es la sección dedicada a las pruebas eléctricas de la misma junto a su respectivo análisis.
- Se culminó con dos aplicaciones prácticas de baja potencia de las celdas tipo PEM, las cuales son un vehículo y un sistema de ventiladores.

2.1. Resultados elaboración de partes

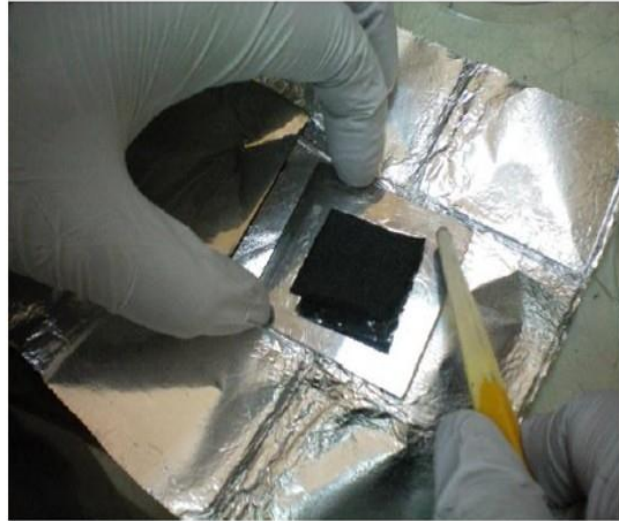
Ensamble membrana electrodos:

Consecuente al proceso de ensamble que se siguió en la metodología, se obtuvo un MEA con membrana y electrodos de geometría cuadrada, con dimensiones de lados de 3 cm y 2 cm respectivamente; resultado que se puede ver evidenciado en la Figura 31 [A]. En la Figura 31 [B] se observa el MEA obtenido por (Hernandez & Martinez, 2011), igualmente cuadrado, aunque con dimensiones diferentes al anterior, siendo 4.5 cm de lado para la membrana y 2.8 cm de lado para los electrodos.

Fig. 31. MEA obtenido posterior al proceso de Hot-Press en: [A] esta investigación, [B] en la investigación de Hernandez (2011).



[A]



[B]

Fuente: [A] Mea prensado en caliente. Creación propia, [B] Tomado de (Hernandez & Martinez, 2011).

Es preciso mencionar que las dimensiones del MEA elegidas para desarrollar la presente investigación obedecen a la disponibilidad de los recursos para el desarrollo de la misma.

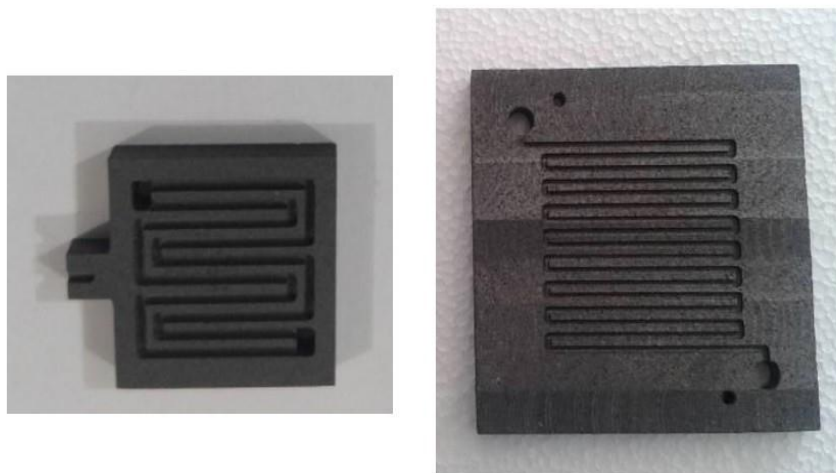
Con el fin de determinar la funcionalidad del MEA obtenido en la presente investigación, se ejecutó la prueba de continuidad entre electrodos, cuyo resultado fue negativo, lo que indica que las condiciones de prensado en caliente no fueron lo suficientemente agresivas con la membrana y solamente en la prueba eléctrica se caracterizara detalladamente cual es el desempeño eléctrico de este MEA.

Platos distribuidores de gas:

Posterior al proceso de diseño y maquinado CNC, en la Figura 32 [A] se puede observar el resultado final de un plato distribuidor de gas; mientras tanto en la Figura 32 [B] se detalla un plato distribuidor de gas que fue elaborado en el trabajo de (Jaramillo & Ocampo, 2013), el cual es muy similar al plato del actual trabajo, aunque tiene dimensiones y geometrías diferentes.

Mientras el plato de (Jaramillo & Ocampo, 2013) es un cuadrado de dimensiones 8 cm de lado con un área activa de 25 cm², el plato desarrollado en la presente investigación es un cuadrado de dimensiones 3 cm de lado con un área activa de 4 cm².

Fig. 32. Platos distribuidores de gas. [A] ´esta investigación, [B] investigación de Jaramillo (2013)



[A]

[B]

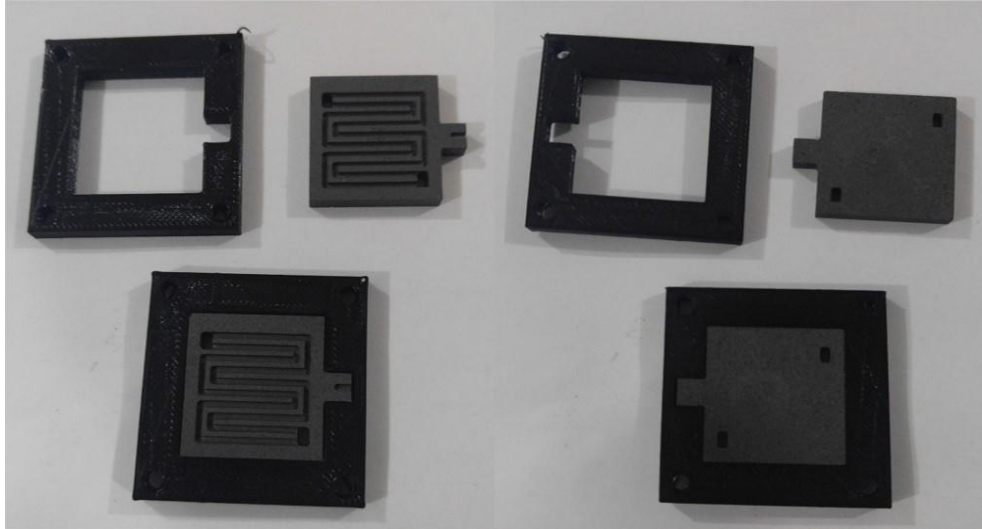
Fuente: [A] Canales elaborados en maquina CNC. Creación propia, [B] Tomado de (Jaramillo & Ocampo, 2013)

Para evaluar y contrastar el comportamiento individual del diseño de los platos distribuidores de gas existen técnicas de simulación propias del campo químico como el uso del software COMSOL (Lakshmi et al., 2017), sin embargo, es posible concluir sobre su funcionamiento cuando se realicen pruebas eléctricas a la celda en conjunto, pruebas que se realizaran en un capítulo posterior.

Carcasa:

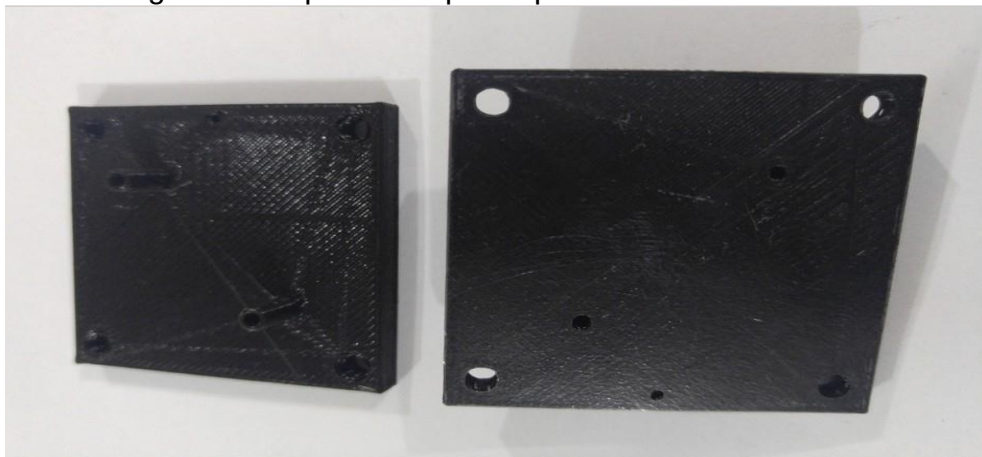
Respecto a los componentes de la carcasa plástica, una vez terminado el diseño de todos los componentes de la misma, fueron elaborados con las técnicas mencionadas en la metodología; los resultados pueden evidenciarse en la Figura 33 y Figura 34.

Fig. 33. Componentes prototipo PEMFC: platos distribuidores de gas y pieza No. 1



Fuente: Partes de la celda en impresión 3d. Creación propia.

Fig. 34. Componentes prototipo PEMFC: Pieza No.2.



Fuente: Parte de la celda en impresión 3d. Creación propia.

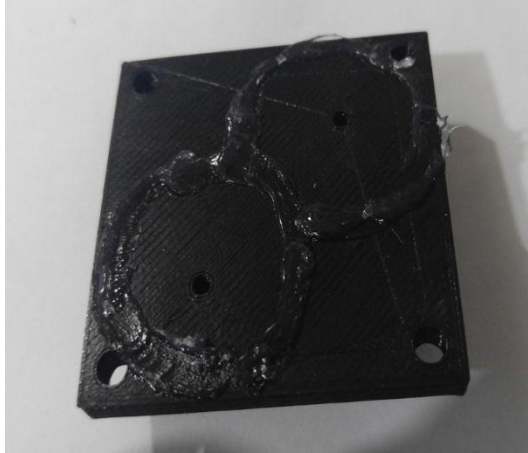
2.2. Proceso de ensamble del prototipo de celda de combustible con membrana de intercambio protónico.

Continuando con el proceso de manufactura, se prosigue a exponer los resultados obtenidos del proceso de ensamble.

- a. Se partió creando dos aros de silicona líquida alrededor de los accesos de gas en la pieza No. 2 como se muestra en la Figura 35, este proceso se realizó una vez más en la segunda pieza No. 2 que complementa el ensamble ya que el

proceso de curado inicial de la silicona que se demora aproximadamente 1 hora 30 minutos debe tratar de efectuarse al mismo tiempo en todas las piezas que lo requieran.

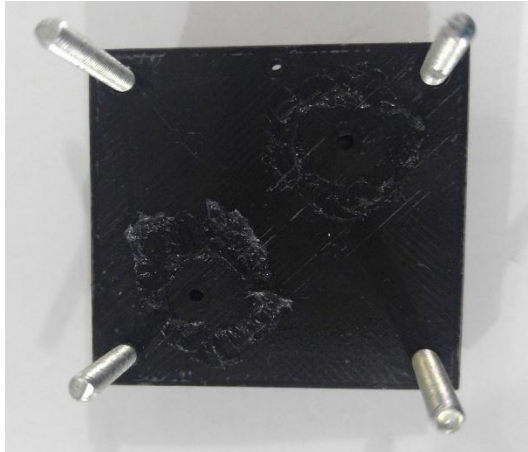
Fig. 35. Elaboración sellos de silicona en la pieza No.2.



Fuente: Parte de la celda en impresión 3d. Creación propia.

- b. Se insertaron los tornillos en cada uno de los cuatro accesos ubicados en la periferia de la pieza No. 2 para que sirvan de rieles en el proceso de ensamble de las demás partes de la celda tal como se muestra en la Figura 36.

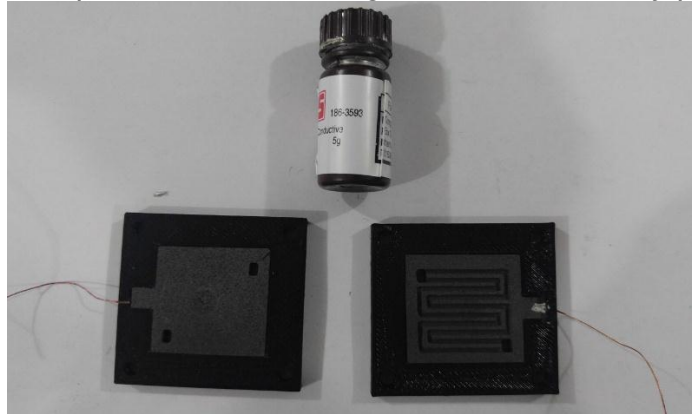
Fig. 36. Instalación de rieles en el ensamblaje.



Fuente: Parte de la celda en impresión 3d. Creación propia.

- c. Continuando con el proceso, se aplicó soldadura de plata para efectuar el ensamble del plato distribuidor de gas y el cable de cobre con el fin de garantizar un contacto eléctrico de calidad para las pruebas posteriores, este proceso se efectuó para ambos platos distribuidores de gas aplicando aire caliente con una pistola de aire para catalizar el proceso de curado de la soldadura que a temperatura ambiente toma 30 minutos según el fabricante.
- d. Se insertó el plato distribuidor de gas en la pieza No. 1 teniendo cuidado en la ubicación del cable de cobre como se muestra en la Figura 37, e igual que en el numeral anterior, el proceso se efectuó en ambos platos distribuidores de gas.

Fig. 37. Ensamble plato distribuidor de gas, cable de cobre y pieza No. 1.



Fuente: Platos distribuidores de gas. Creación propia.

- e. Ahora, con ayuda de silicona y una pequeña espátula impresa en PLA, se sellaron los posibles orificios que den pie a fugas indeseadas de gas reactante en las uniones de las piezas ensambladas en el numeral anterior, tal como se muestra en la Figura 38 e igual que en el numeral c, se aplica aire caliente para acelerar el proceso de curado de esta capa de silicona.

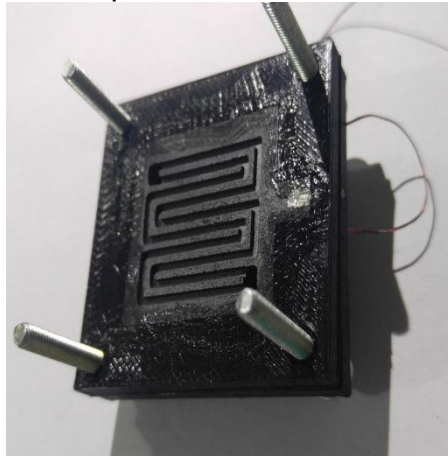
Fig. 38. Sello de posibles fugas de gas con ayuda de silicona en el ensamble de la figura anterior.



Fuente: Platos distribuidores de gas. Creación propia.

- f. Con la silicona aún fresca, se insertó en el ensamble del numeral b la pieza ensamblada en el numeral anterior tal como se muestra en la Figura 39 teniendo en cuenta la concordancia con el agujero de la pieza No. 2 por el cual pasa el cable de cobre.

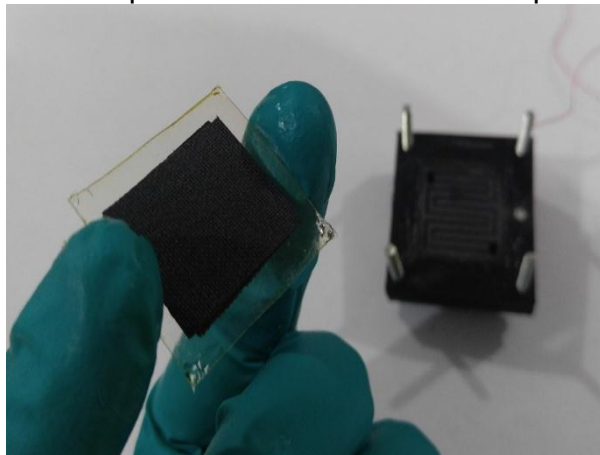
Fig. 39. Ensamble temporal celda de combustible tipo PEM



Fuente: Platos distribuidores de gas. Creación propia.

- g. Posteriormente, se usan guantes de látex para evitar contaminar el MEA, se le aplicó a éste pequeñas cantidades de silicona líquida en cada una de las esquinas para evitar que se desplace en el ensamble una vez hecho el montaje tal como se puede evidenciar en la Figura 40.

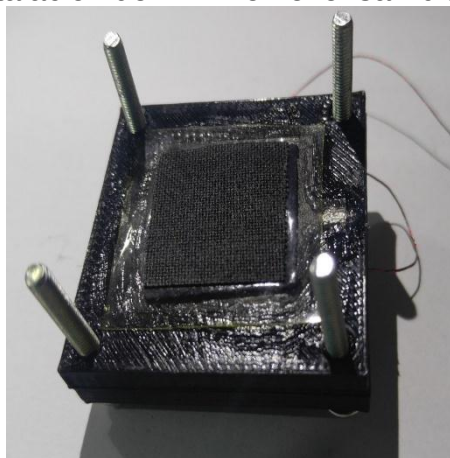
Fig. 40. Aplicación de puntos de silicona en las esquinas del MEA.



Fuente: Ensamble membrana electrodos. Creación propia.

- h. Posteriormente se instaló el MEA en el ensamble del numeral f, tal como se indica en la Figura 41 teniendo en cuenta que el electrodo debe corresponder en ubicación a los canales de flujo de gas.

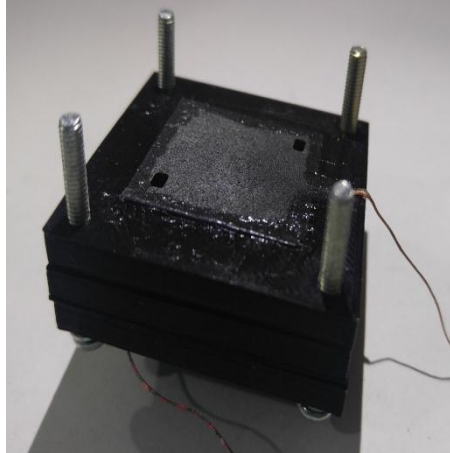
Fig. 41. Instalación del MEA en el ensamble general.



Fuente: Creación propia.

- i. Cuidadosamente se instaló un ensamble del numeral e en el ensamble anterior teniendo en cuenta la ubicación opuesta del plato distribuidor de gas y su cable conductor, tal como se muestra en la Figura 42.

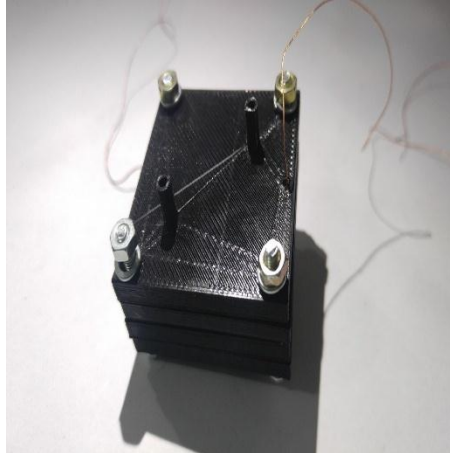
Fig. 42. Referencia de instalación del segundo plato distribuidor de gas en el ensamble general.



Fuente: Creación propia.

- j. Se instaló la última capa, que corresponde a una pieza No.2 con su respectiva silicona aplicada, preferiblemente que esté fresca, teniendo en cuenta la ubicación del cable conductor y su correspondencia con el agujero dispuesto para éste, tal como se indica en la Figura 43; posteriormente a esto se colocaron las tuercas y arandelas correspondientes.

Fig. 43. Prototipo de celda ensamblada.

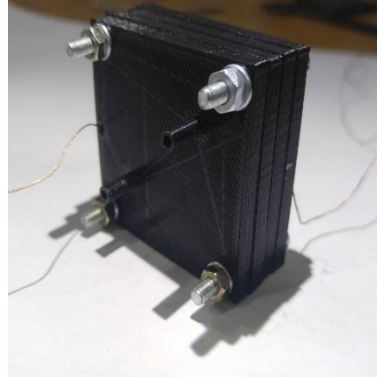


Fuente: Creación propia.

- k. Finalmente se designó a una persona para que apriete los tornillos, tratando de utilizar una misma fuerza en cada uno de ellos.

- I. En la Figura 44 se puede visualizar la celda finalizada después de 24 horas de curado de la silicona.

Fig. 44. Prototipo de celda ensamblada.



Fuente: Creación propia.

2.3. Pruebas eléctricas y curvas de polarización

Para empezar con el proceso de toma de pruebas eléctricas se inició con lo descrito en la metodología referente a la Figura 29. La anterior prueba se realizó tanto a la celda prototipo como a la celda comercial tipo PEMFC marca Horizon, la cual fue como referencia como se había mencionado anteriormente, las mediciones se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Pruebas preliminares en prototipo de celda PEMFC

	VOLTAJE (mV)	CORRIENTE (mA)
<i>Corto Circuito Celda Prototipo</i>	4,270	36,330
<i>Circuito Abierto Celda Prototipo</i>	786,176	0
<i>Corto Circuito Celda Comercial</i>	3,62	38,83
<i>Circuito Abierto Celda Comercial</i>	757,136	0

Fuente: Creación propia.

De modo que, una celda comercial tipo PEM adquirida en *Fuel Cell Store* con área activa de 4 cm^2 genera 757,136 mV en circuito abierto y 38,83 mA en cortocircuito,

mientras la celda construida en el laboratorio CIMA, con un área activa de 4 cm² genera 786,176 mV en circuito abierto y 36,330 mA en corto circuito. Como se puede evidenciar las magnitudes de potencial y de corriente son similares, afirmando que el funcionamiento de la celda prototipo se equipara inicialmente al funcionamiento de la celda comercial.

Referente a las celdas construidas por (Hernandez & Martinez, 2011) y (Jaramillo & Ocampo, 2013), no se puede realizar una comparación de las medidas de voltajes y corrientes máximos debido a que ellos utilizaron alimentación de gases reactantes por medio de tanques de almacenamiento, e inyectaron los combustibles a una presión diferente a la utilizada por el electrolizador empleado en la presente investigación.

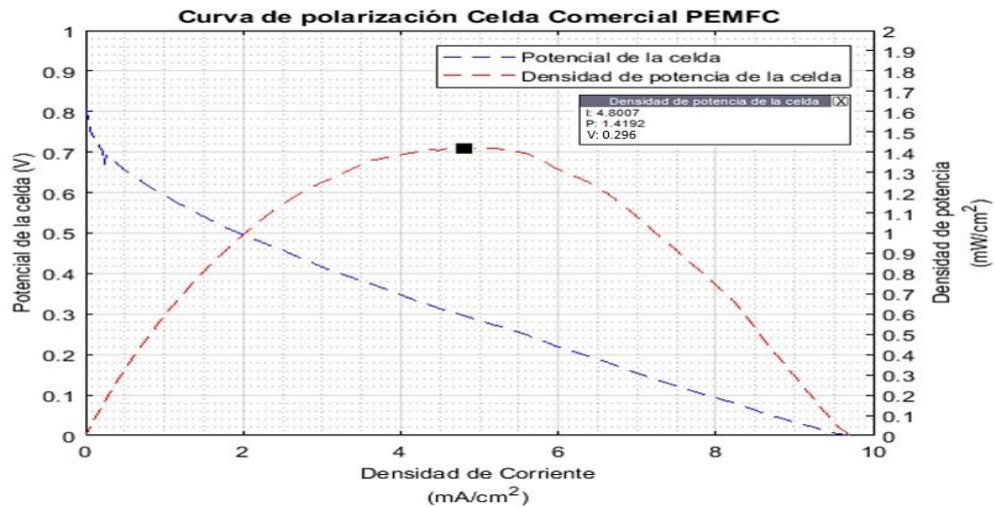
Lo anterior, teniendo en cuenta que según (Barbir, 2013) a mayor presión de alimentación de los gases reactantes mayor desempeño eléctrico.

Finalmente, la densidad de corriente en corto circuito para la celda comercial fue de 9,7075 [A/cm²] y la densidad de corriente en cortocircuito del prototipo de celda construida en el laboratorio CIMA sería de 9,0825 [A/cm²]; de esta forma se concluye que la celda prototipo es funcional y se continua con la toma de la curva de polarización de ambas celdas.

En la Figura 45, se puede observar la curva de polarización resultante después de efectuar el proceso registrado en la metodología; cabe mencionar que en esta figura se ha graficado simultáneamente el potencial vs. la densidad de corriente en color azul y la densidad de potencia vs. la densidad de corriente en color rojo.

El grafico de densidad de potencia vs. densidad de corriente es necesario debido a que de él se deduce el punto de máxima eficiencia de la celda, punto que se ubica en la cima o parte superior de este gráfico, teniendo en cuenta que la densidad de potencia se calcula multiplicando en cada punto la densidad de corriente por su respectivo potencial.

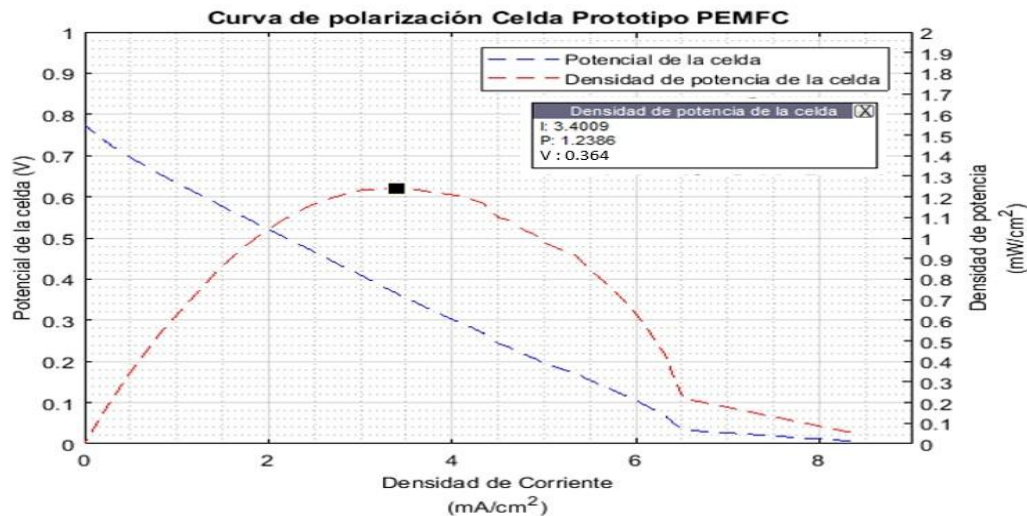
Fig. 45. Curva de polarización celda comercial.



Fuente: Grafica diseñada en Matlab. Creación propia.

Consecuentemente en la Figura 46, se puede observar las gráficas del potencial vs. la densidad de corriente en color azul y la densidad de potencia vs. la densidad de corriente en color rojo para la celda prototipo permitiendo deducir igualmente el punto de máxima eficiencia de la celda prototipo.

Fig. 46. Curva de polarización celda prototipo.



Fuente: Grafica diseñada en Matlab. Creación propia.

Finalmente, en la Tabla 6, se compara los puntos de máxima eficiencia de las celdas concluyendo que los métodos y las maquinas empleadas para la

construcción del prototipo de celda PEMFC fueron los adecuados, a tal punto de igualar en un 87% el punto de máxima densidad de potencia de una celda comercial.

Tabla 6. Comparación puntos de máxima eficiencia

	VOLTAJE (mV)	DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/cm ²)	DENSIDAD DE POTENCIA (mW/cm ²)
<i>Punto máxima eficiencia celda comercial</i>	296	4,8007	1,4192
<i>Punto máxima eficiencia celda prototipo</i>	364	3,4009	1,2386

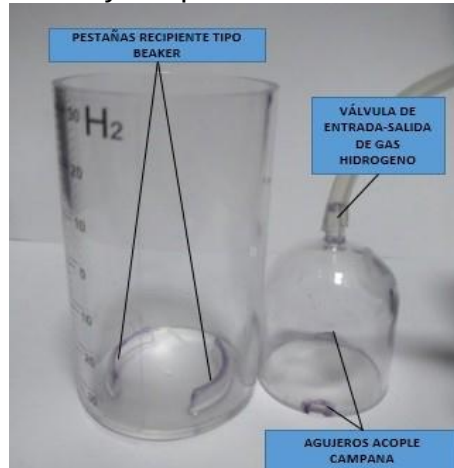
Fuente: Creación propia.

2.4. Aplicaciones con celdas tipo PEM

Con el propósito de dar a conocer el funcionamiento de las celdas de combustible tipo PEM propuestas en la presente investigación, se decidió implementar dos aplicaciones mostrando el funcionamiento de las celdas, por lo tanto, se construyeron dos sistemas: un sistema de ventiladores y un vehículo.

Para la alimentación de las celdas, en las dos aplicaciones se utilizó un recipiente plástico tipo beaker de tonalidad transparente, con una capacidad de 30 ml y el cual, en su interior tenía un par de pestañas que facilitaban el acople con un recipiente en forma de campana Figura 47.

Fig. 47. Beaker y recipiente en forma de campana.



Fuente: Creación propia.

El acople en forma de campana mostrado en la figura anterior tiene dos características: la primera es que tiene dos agujeros en su base, y la segunda, es que este acople posee una válvula en un extremo, permitiendo el ingreso o salida de gas hidrogeno.

Cuando se ensamblan las piezas mostradas en la Figura 47, el recipiente en forma de campana necesariamente debe quedar en una posición tal que sus agujeros eviten interponerse con las pestañas del beaker, de manera que estos queden libres para el ingreso y salida de agua. En la Figura 48 se puede apreciar cual es la manera correcta de como incorporar la campana al beaker.

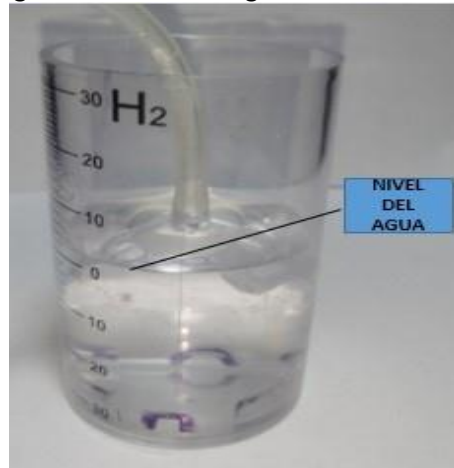
Fig. 48. Correcto ensamble de la campana en el interior del beaker.



Fuente: Creación propia.

Posteriormente, al conjunto anterior se le agrega agua destilada con el fin de alcanzar el nivel 0 tal como se muestra en la Figura 49.

Fig. 49. Nivel de agua en el beaker.



Fuente: Creación propia.

Finalmente, se abastece de hidrogeno el montaje anterior por medio de un sistema válvula - manguera, de manera que el gas ingrese a la campana desplazando agua en una proporción equivalente al volumen de gas entrante, que en este caso es 30ml. En la Figura 50 se muestra la cantidad de agua desplazada debido al ingreso de gas en el recipiente en forma de campana.

Fig. 50. Nivel de agua en el beaker.



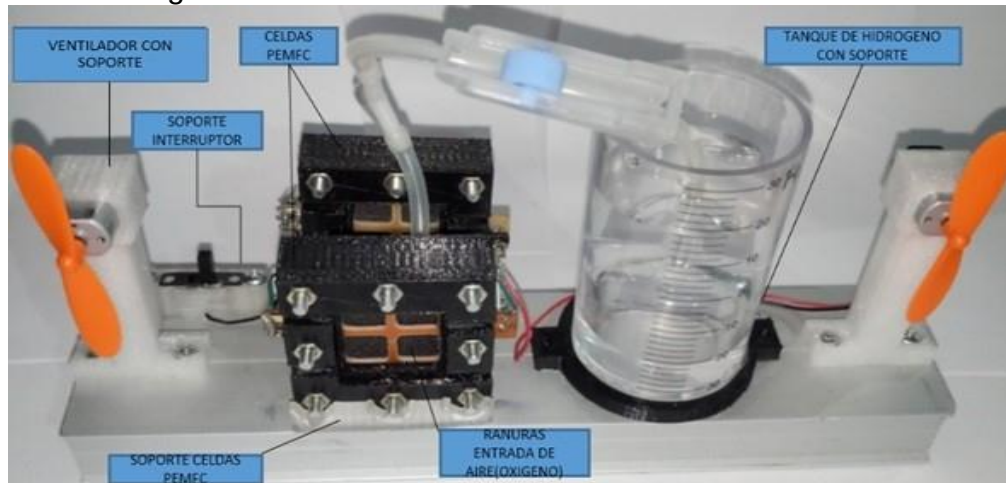
Fuente: Creación propia.

En la figura anterior se puede evidenciar que el gas hidrogeno es contenido en el interior del recipiente en forma de campana, de forma que este actúa como un pequeño tanque de almacenamiento, el cual, al momento de activar la válvula, el hidrogeno saldrá a presión atmosférica alimentando las aplicaciones que se describen a continuación:

2.4.1. Sistema de ventiladores:

Esta aplicación se compone de dos celdas de combustible tipo PEMFC (PEMFC1-PEMFC2), que son alimentadas por hidrogeno a través de un pequeño tanque por medio de un sistema de válvulas, además de gas oxigeno que es tomado del aire mediante unas pequeñas ranuras en la parte frontal de las celdas (Figura 51).

Fig. 51. Sistema de ventiladores con celdas PEMFC



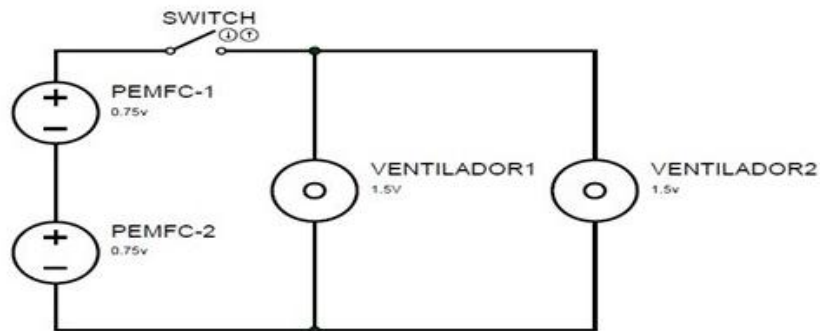
Fuente: Creación propia.

Cada una de estas celdas tiene en su interior un MEA, el cual posee un área activa de 4 cm^2 (ver Figura 9 [C]) y que produce un potencial y una corriente 0.75 V y 50 mA respectivamente.

Las celdas descritas anteriormente (PEMFC1-PEMFC2), se encuentran conectadas en configuración circuital serie, por lo tanto el potencial total de salida se duplicara hasta 1.5 V, al mismo tiempo que se mantiene el nivel de corriente a un valor de 50 mA según ley la de ohm para circuitos en serie; lo anterior con el fin de entregar un mayor potencial a una pequeña carga, que consiste en alimentar a un conjunto de ventiladores (FF-N30VB-09210) que se encuentran conectados en configuración circuital en paralelo con el conjunto de celdas. El

esquema circuitual de la Figura 52 muestra la conexión de los componentes en la aplicación

Fig. 52. Representación circuitual del Sistema de ventiladores.



Fuente: Diseñado en PROTEUS. Creación propia.

Ahora bien, como el potencial total que entregan las celdas (1.5 V) es mayor al potencial de funcionamiento de los ventiladores (0.7 V) estos no tendrán problemas de operatividad, de manera que cuando se cierre el interruptor se genera movimiento en estos.

Los datos de voltajes y corrientes a circuito abierto y cortocircuito se resumen en la

Tabla 7:

Tabla 7. Pruebas preliminares en prototipo de celda PEMFC.

	VOLTAJE (mV)	CORRIENTE (mA)
<i>Corto circuito celdas serie</i>	1,270	50,0
<i>Circuito abierto celdas serie</i>	1250	0

Fuente: Creación propia.

Algunas de las características del sistema de ventiladores compuesto por dos celdas en serie son:

Tabla 8. Características del sistema de ventiladores.

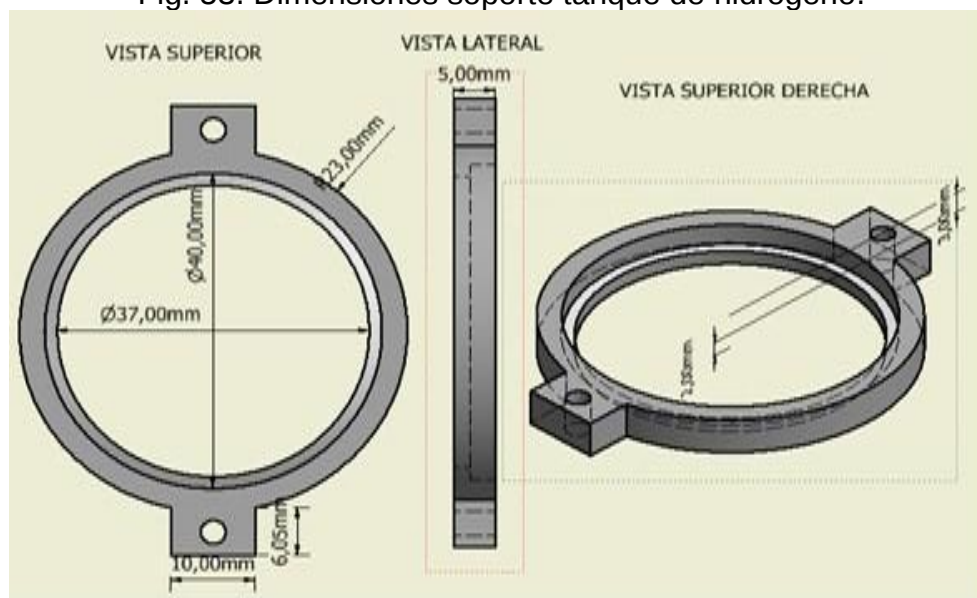
	CARACTERISTICA
<i>Resistencia de la carga (ventiladores)</i>	8,4 OHMS
<i>Contenido tanque de hidrogeno</i>	30 ml

Fuente: Creación propia.

Las partes que conforman el sistema con ventiladores se detallan a continuación a través de esquemas, teniendo en cuenta las características como la forma y dimensiones de cada pieza las cuales fueron diseñadas en software CAD (Autodesk Inventor):

- a) **Soporte para tanque de hidrogeno:** Fija y mantiene el tanque de hidrogeno (ver Figura 51) de manera que el contenido: agua y gas reactante (H_2) no se desborde al momento de realizar la prueba.

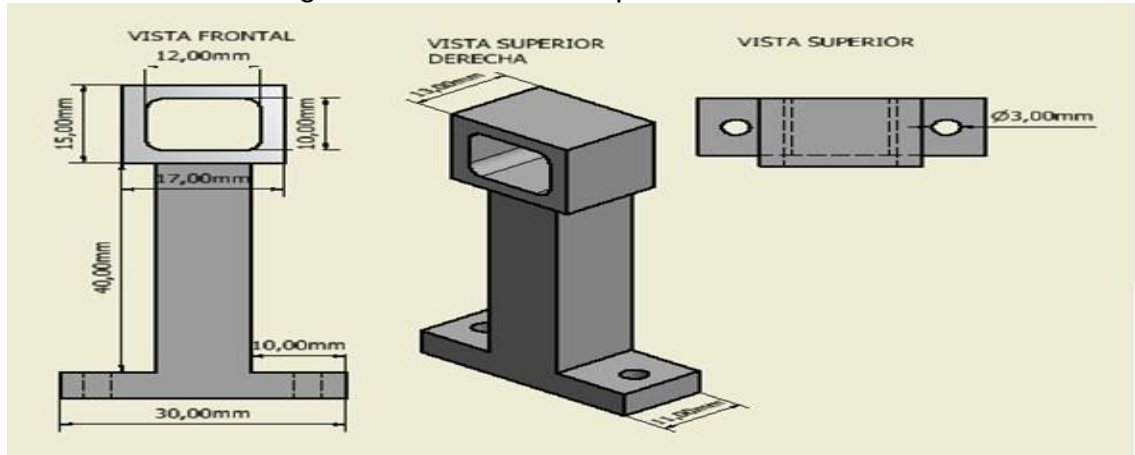
Fig. 53. Dimensiones soporte tanque de hidrogeno.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- b) **Soporte ventiladores:** fija los ventiladores de manera que crea un espacio entre la base de este soporte y las hélices del motor evitando rozamiento (ver Figura 51).

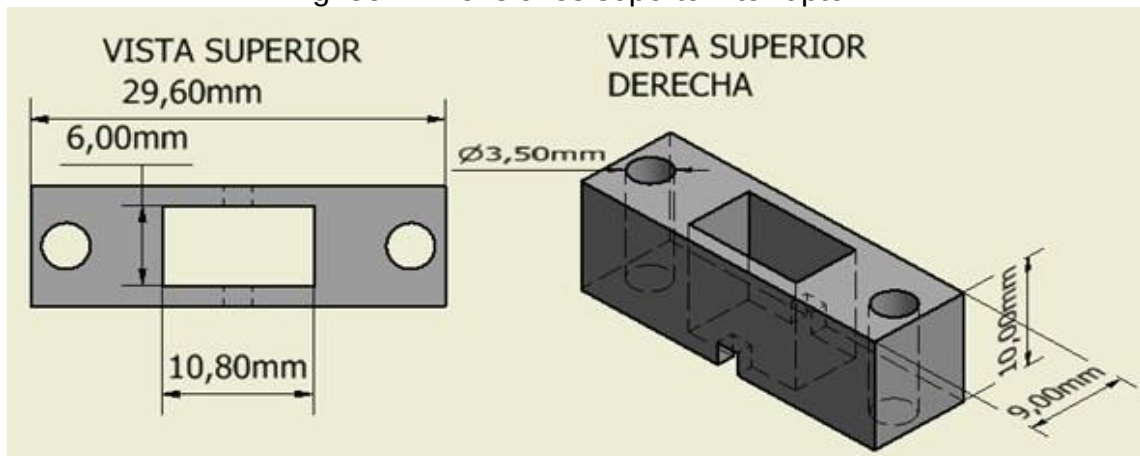
Fig. 54. Dimensiones soporte ventiladores.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- c) **Soporte interruptor:** Aísla eléctricamente al interruptor, a su vez que lo fija a través de tornillos a la base de aluminio, mejorando la conmutación de encendido/apagado (ver Figura 51).

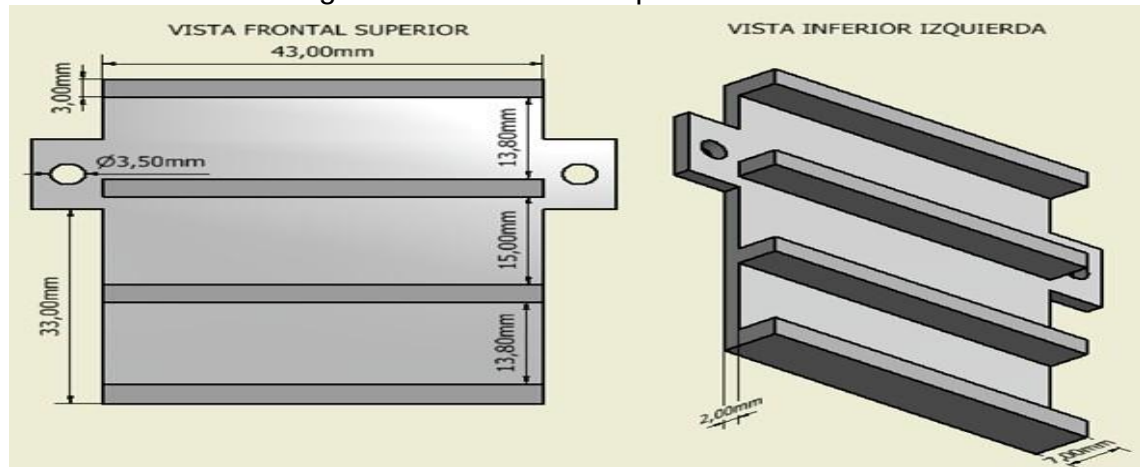
Fig. 55. Dimensiones soporte interruptor.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- d) **Soporte de celdas:** Sostiene al par de celdas PEMFC y las mantiene separadas por una distancia de 15 mm, con el fin de mejorar el flujo de gases a través de pequeñas mangueras (ver Figura 51).

Fig. 56. Dimensiones soporte de celdas.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

2.4.2. Aplicación de Vehículo con celdas de combustible tipo PEMFC:

La aplicación del vehículo se compone por un STACK de tres celdas (PEMFC1- PEMFC2- PEMFC3), que consiste en una configuración circuital serie introducidas en el interior de un soporte principal (ver Figura 78).

Similar a la aplicación del sistema de ventiladores, este conjunto de celdas es alimentado con hidrogeno por medio de un tanque a través de una válvula, al mismo tiempo que oxígeno, el cual se toma del aire a través de pequeñas ranuras en la parte frontal del STACK Figura 57.

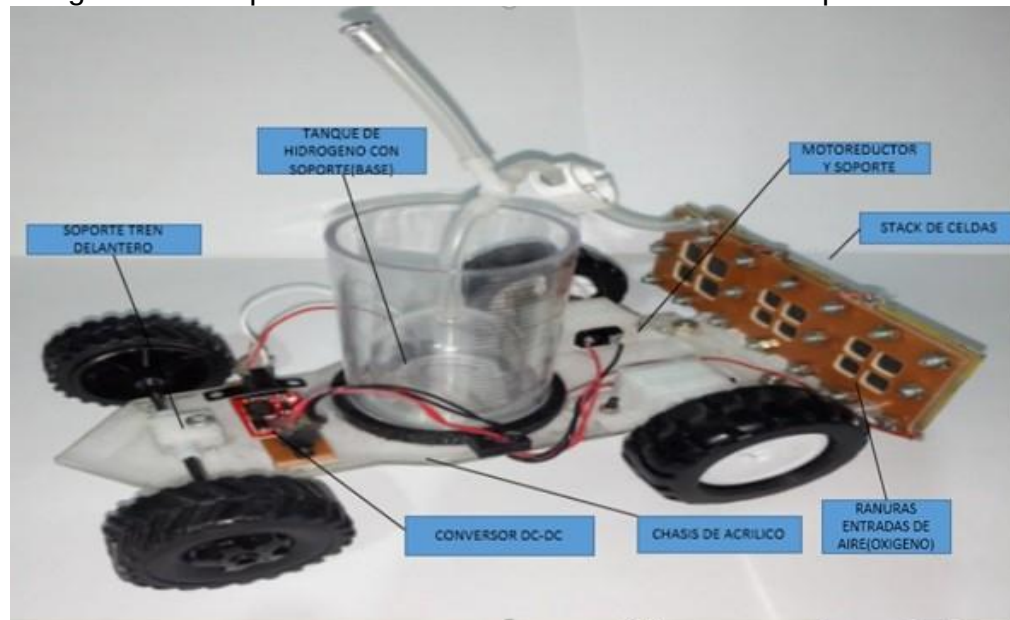
Cada celda que compone el STACK (PEMFC1-PEMFC2-PEMFC3), tiene un área activa de 4 cm^2 , genera un potencial 0.75 V en circuito abierto y una corriente de 50 mA en corto circuito; por lo tanto, el conjunto de celdas entrega un potencial total de 2.25 V manteniendo la corriente constante, ya que como se mencionó anteriormente se encuentran en configuración circuital serie.

El STACK que se observa en la parte trasera del vehículo (Figura 57), se construyó con el propósito de generar mayor potencia eléctrica, y por lo tanto producir movimiento a un pequeño automóvil el cual estuvo conformado por dos moto-reductores (N20-100) con sus respectivas ruedas de goma (N20 3PI) y un tren delantero conformado por dos ruedas al que se le implemento un pequeño soporte con el objetivo de establecer manualmente la dirección o el recorrido del vehículo.

En cuanto a la potencia que demandan los moto-reductores, estos operan con un potencial mínimo de 2.0 v, por lo tanto, se consideró la necesidad de incorporar un conversor DC/DC (Sparfun-NCP1402) conectado en paralelo con estos aumentando el potencial del stack de celdas hasta 3.3 v (ver Figura 58). De este modo, el conversor mantiene este nivel de energía permanentemente, lo cual se traduce en movimiento continuo en el vehículo hasta que el combustible se termine.

El prototipo final del vehículo, en cuanto a las partes que lo conforman y el circuito básico que representa este sistema de coche, se muestran a continuación (Figura 57) y (Figura 58) respectivamente.

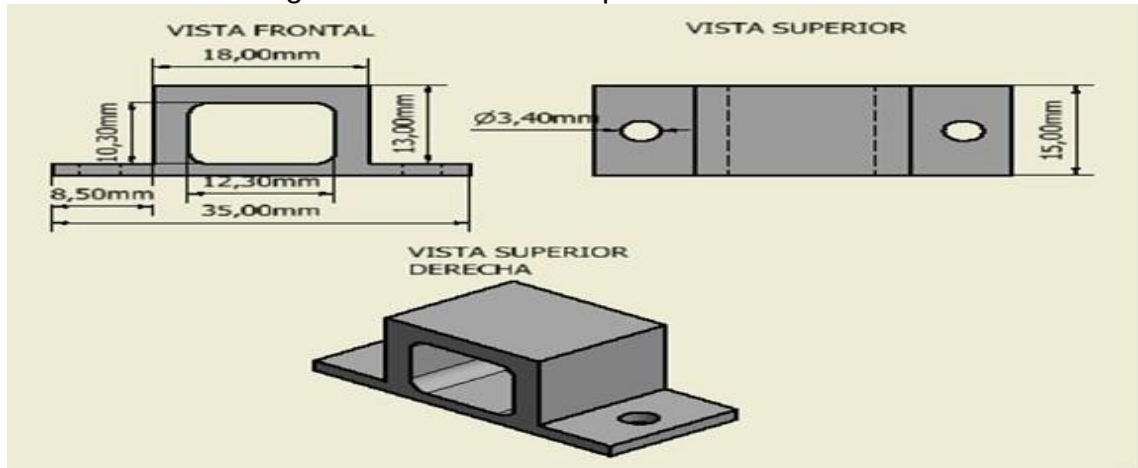
Fig. 57. Prototipo de automóvil con STACK de celdas tipo PEMFC.



Fuente: Creación propia.

Fig. 58. Representación circuital del automóvil.

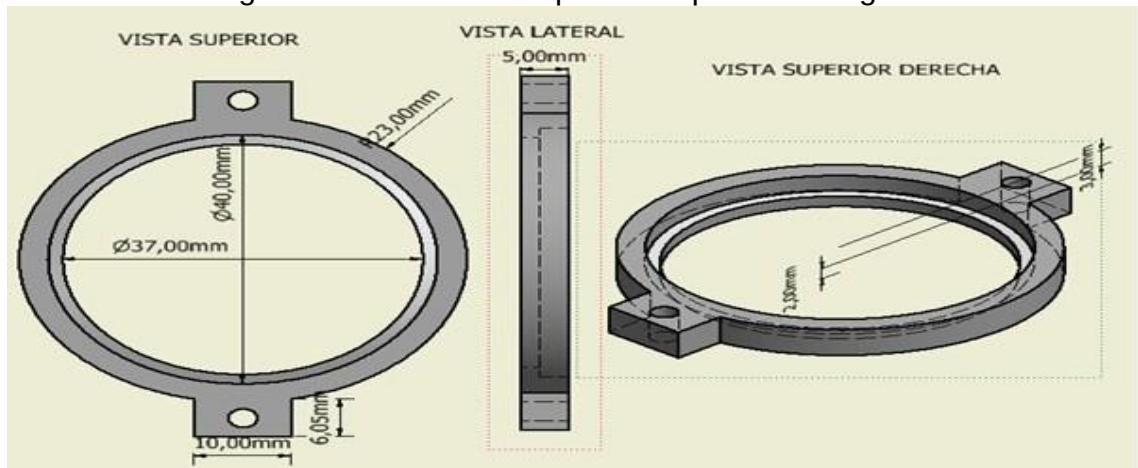
Fig. 60. Dimensiones soporte moto-reductor.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- c) **Soporte para tanque de hidrogeno:** Fija y mantiene el tanque de hidrogeno (Figura 52) de manera que el contenido: agua y gas reactante (H_2) no se desborde al momento de realizar la prueba.

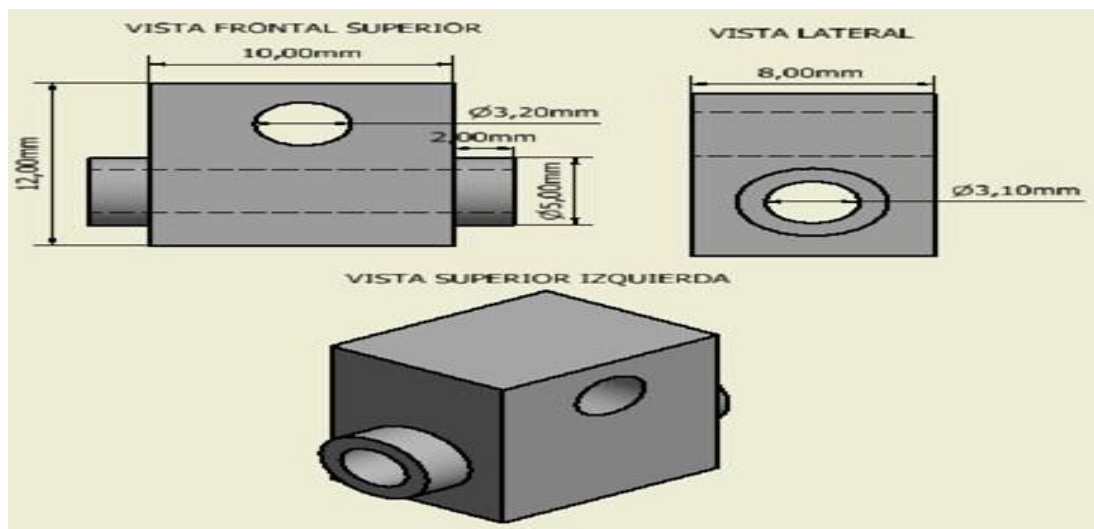
Fig. 61. Dimensiones soporte tanque de hidrogeno.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- d) **Soporte tren delantero:** Sostiene el par de llantas delanteras del automóvil y establece manualmente la dirección de este.

Fig. 62. Dimensiones soporte tren delantero.

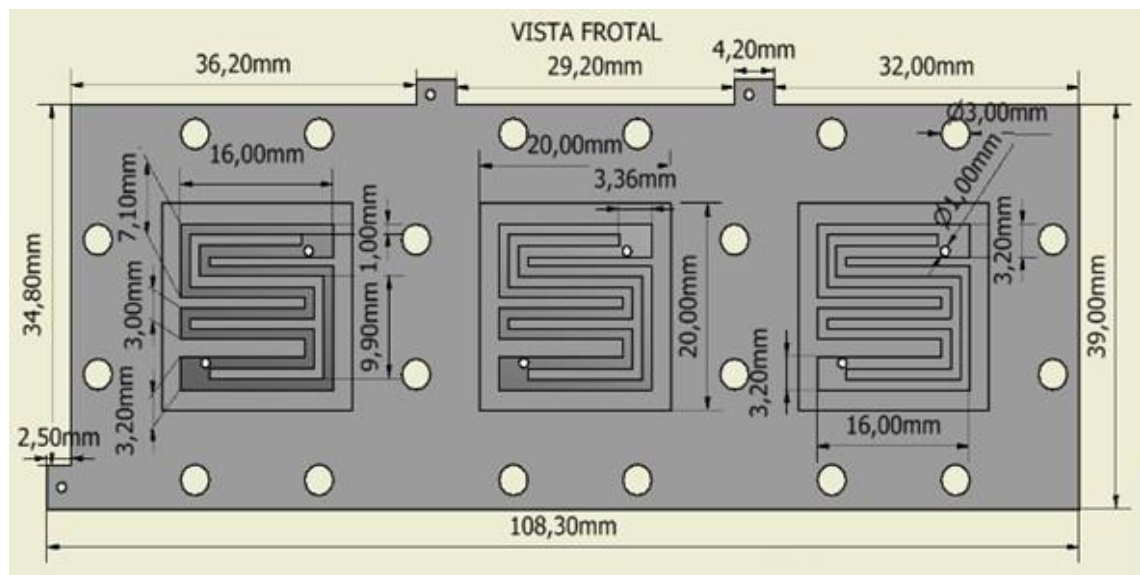


Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Las partes que componen el STACK, se diseñaron con plaquetas de circuito tipo PCB, ya que tienen la capacidad de ser conductoras, tienen un delgado espesor (1,6mm), son económicas y de fácil manipulación en cuanto al fresado de los canales; además que estos aportan muy poco peso de manera que la aplicación de automóvil se movió con mayor dinámica. Los esquemas que componen el STACK son los siguientes especificando sus dimensiones:

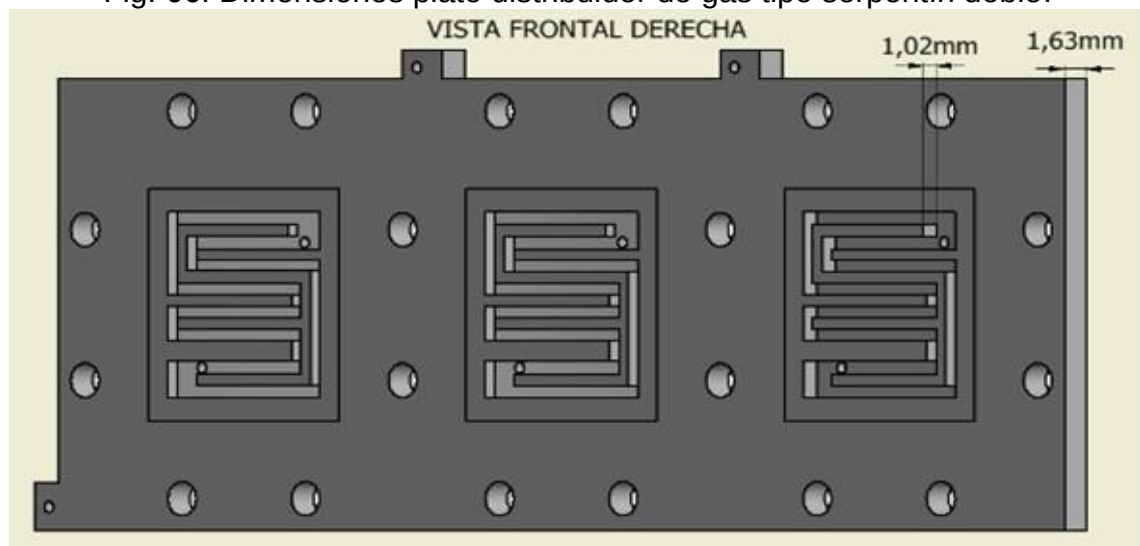
A. Platos distribuidores de gas (solo para hidrogeno-PARTE 1): Distribuye gas hidrogeno a los demás platos de la celda a través de dos canales, uno de ellos para el ingreso de gases y el restante para eliminar el exceso de hidrogeno o gas inutilizado.

Fig. 63. Dimensiones plato distribuidor de gas.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

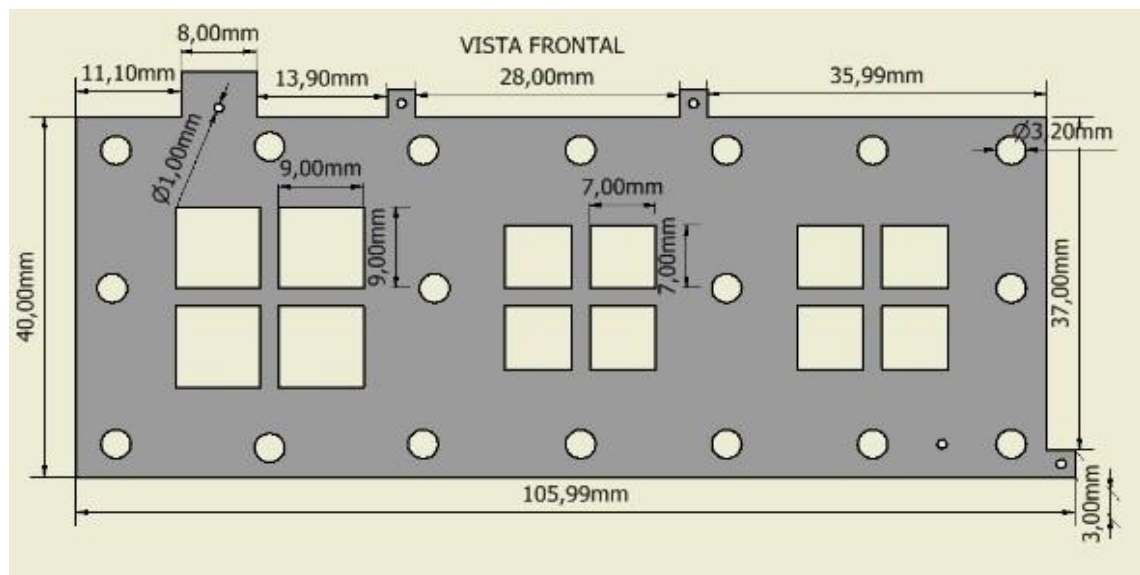
Fig. 66. Dimensiones plato distribuidor de gas tipo serpentin doble.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

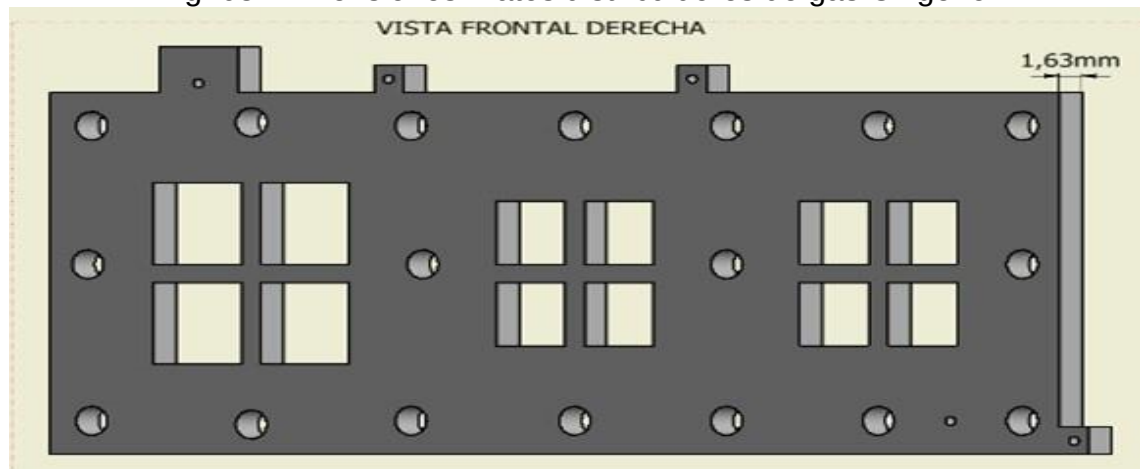
C. Platos distribuidores de gas (solo para oxigeno - PARTE 3): Toma gas oxigeno del aire por medio de pequeñas aberturas en forma cuadrada, al mismo tiempo que conduce electricidad.

Fig. 67. Dimensiones Platos distribuidores de gas Oxigeno.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Fig. 68. Dimensiones Platos distribuidores de gas Oxigeno.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

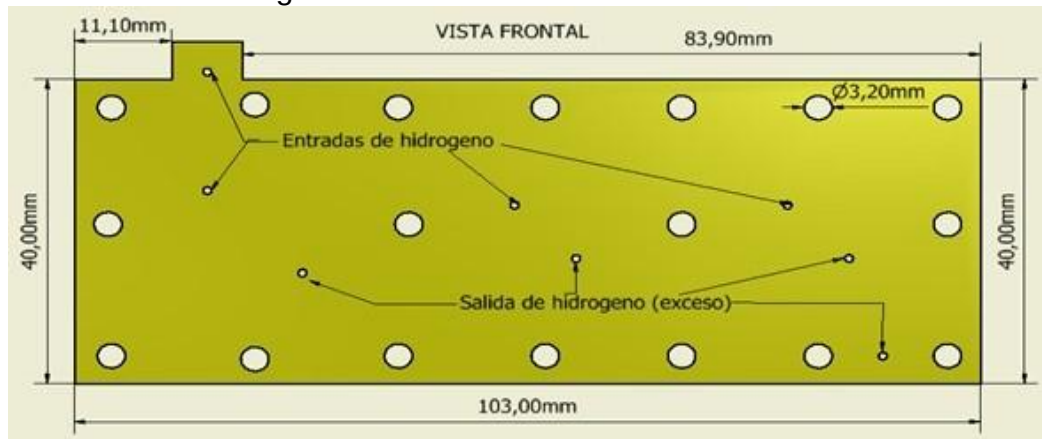
Sellos de látex:

Son necesarios en este tipo de ensamble de STACK, ya que aseguran que el gas reactante (H_2) sea distribuido uniformemente, reduciendo drásticamente posibles fugas debidas a la presión. Los sellos se elaboraron con material de látex que tiene un espesor de 0.4 mm y el corte se da a través de láser con una maquina

CNC. Los sellos de látex para la elaboración del STACK se muestran continuación:

Sello de látex S1:

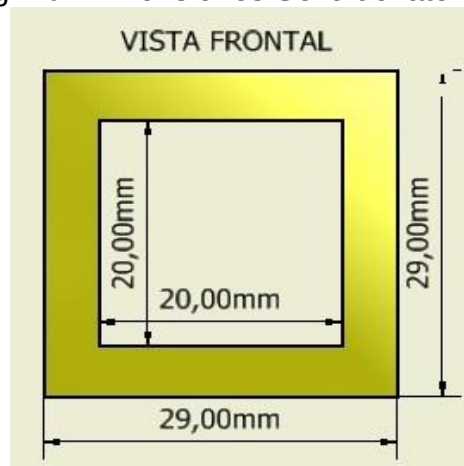
Fig. 69. Dimensiones Sello de látex S1.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Sello de látex S2:

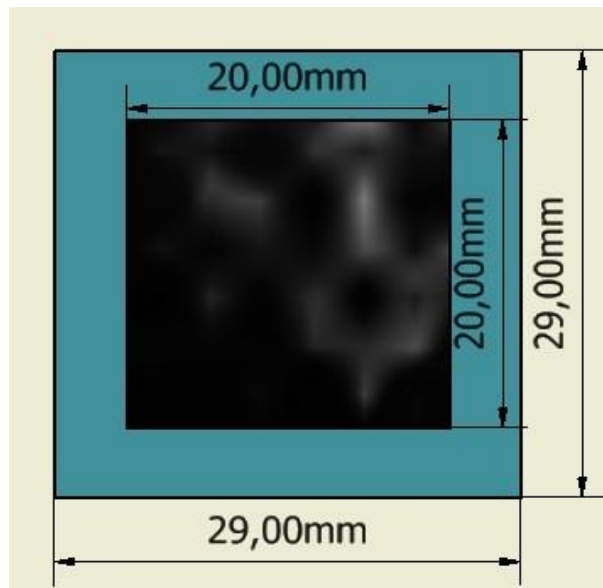
Fig. 70. Dimensiones Sello de látex S2.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Ensamble de membrana-electrodos(MEA):

Fig. 71.MEA

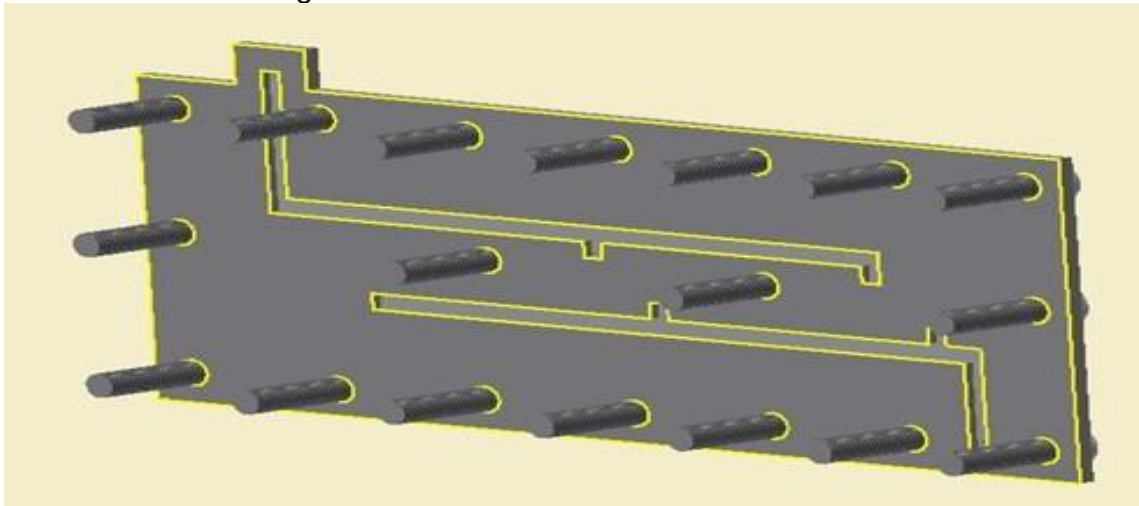


Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

Ensamble STACK vehículo:

- I. En una PARTE 1 (ver Figura 63) se introducen tornillos de métrica M3 (3mmx12mm) en cada agujero:

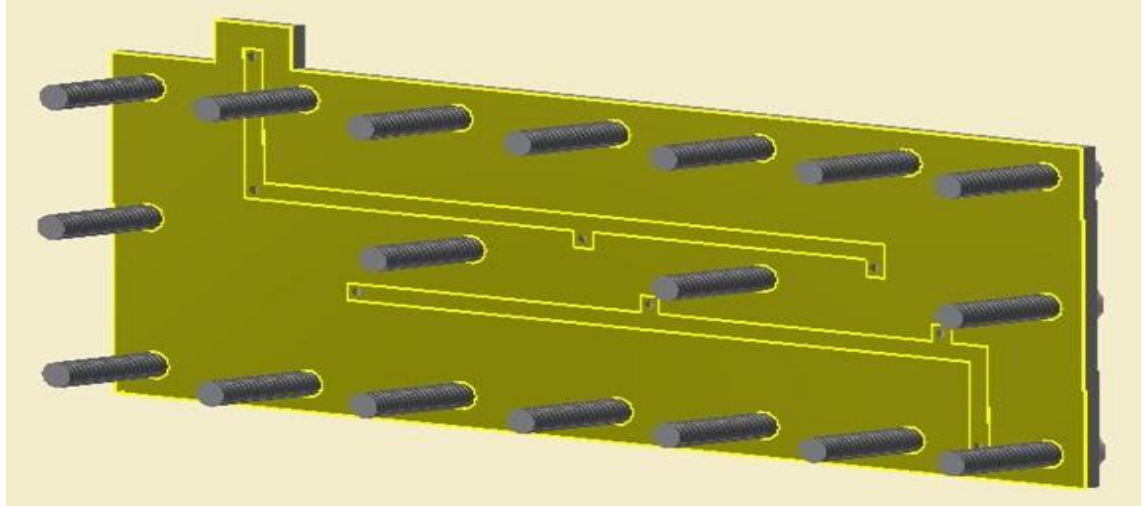
Fig. 72. Introducción de tornillos en PARTE 1.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- II. Luego se introduce un sello de látex S1 (ver Figura 69) en el ensamble anterior de manera que este sello toque la superficie:

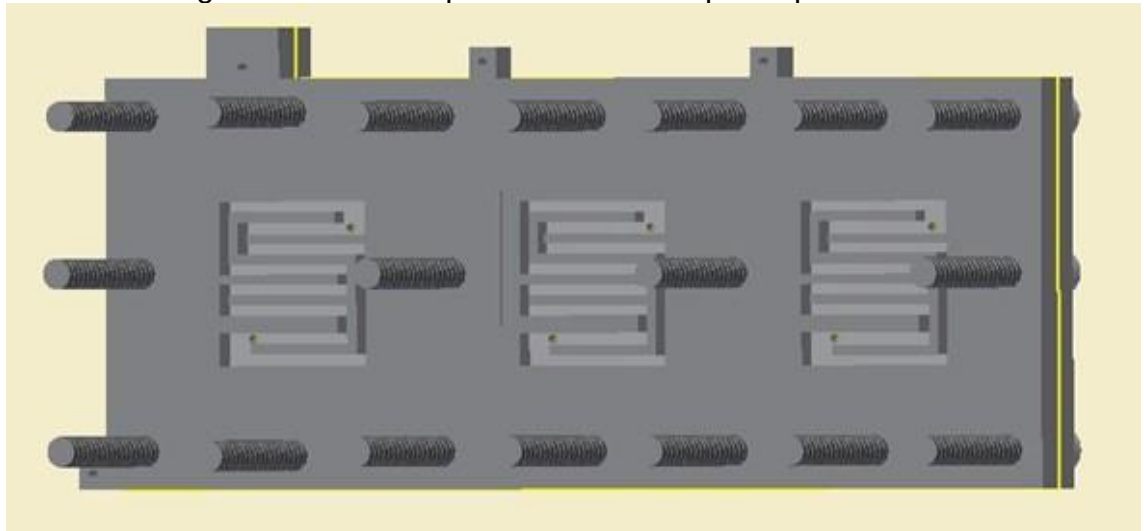
Fig. 73. Instalación de sello de látex S1.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- III. Una vez se asegura el sello de látex S1 se procede a insertar un plato distribuidor de gas tipo serpentín doble PARTE 2 (ver Figura 65):

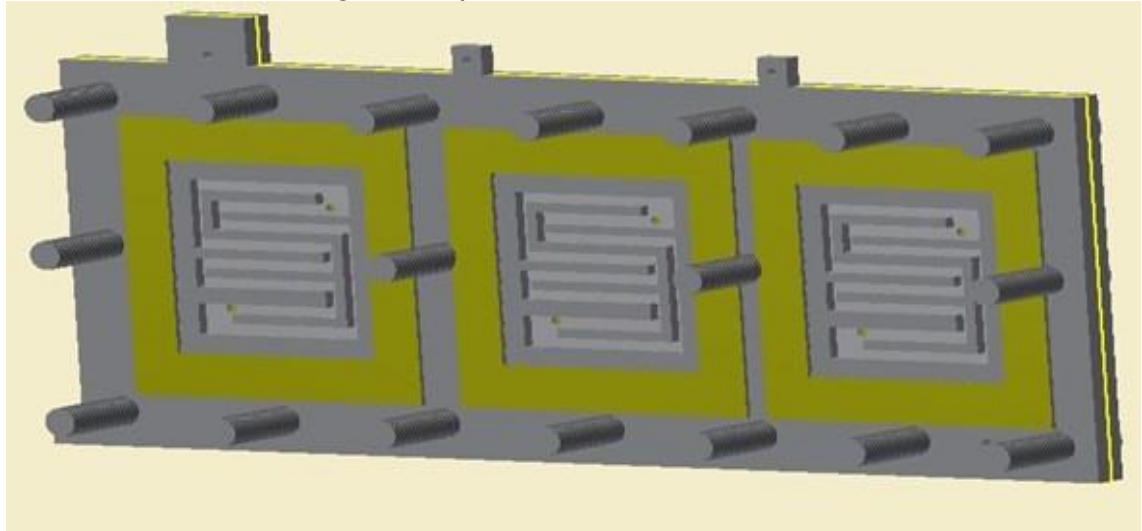
Fig. 74. Insertando plato distribuidor tipo serpentín doble.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- IV. Se prepara tres sellos de látex S2 (ver Figura 70) y se los inserta en el cuadrante de cada serpentín del montaje anterior, de manera que actúen como impermeabilizantes de gas reactante de tal forma que este no escape, asegurando así un mejor funcionamiento:

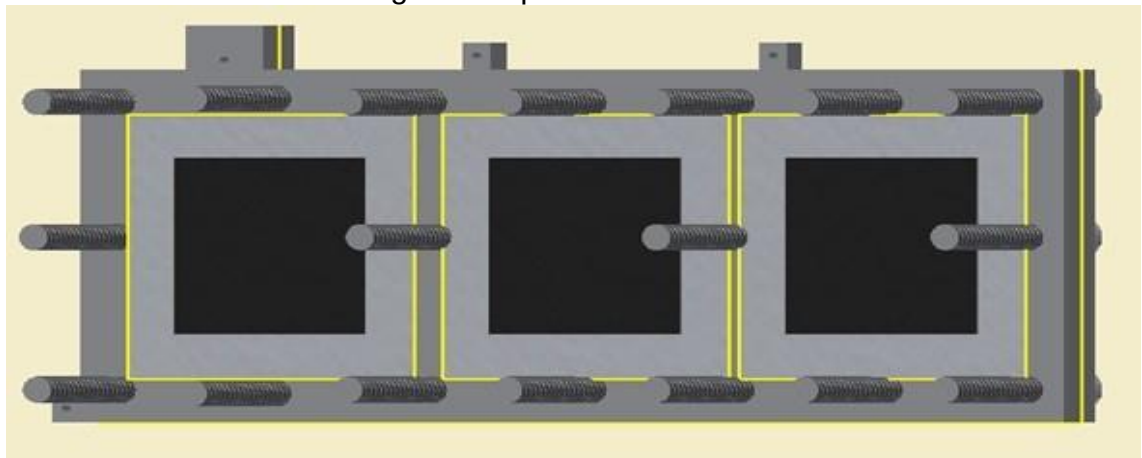
Fig. 75. Implementación de sellos S2.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- V. Luego, encima de los sellos de látex S2 se introducen los MEAs (ver Figura 71) elaborados de manera que un lado de estos permanezca fijo en el cuadrante de cada sello:

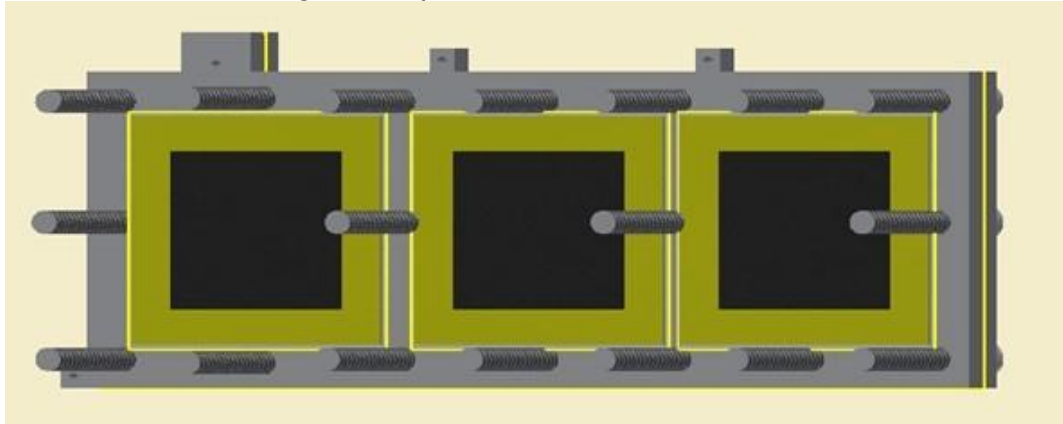
Fig. 76. Deposición de MEAs.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- VI. Una vez que los MEAs se encuentran fijos, se introduce otro sello del tipo S2 garantizando una total permeabilidad de gases reactantes en ambos lados del MEA de manera que se presenta un correcto flujo de gases y por lo tanto un correcto funcionamiento:

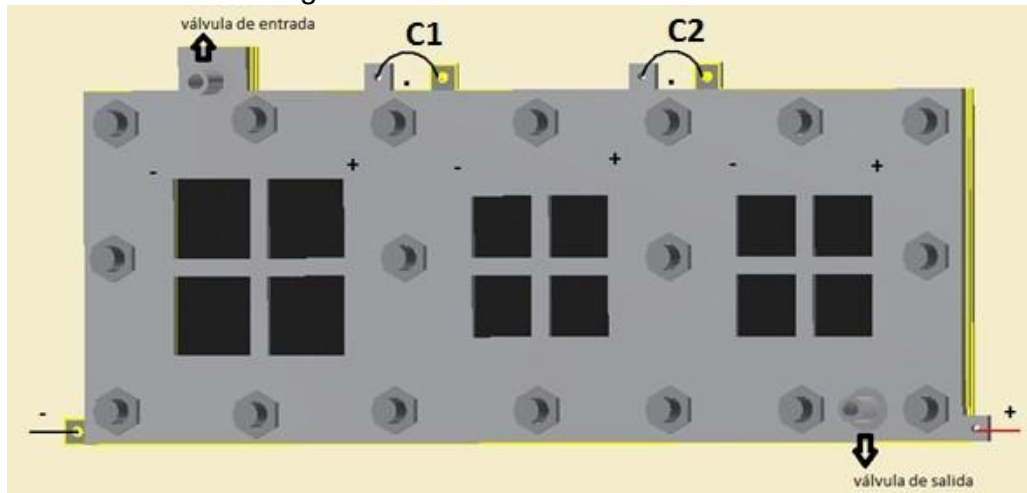
Fig. 77. Implementación de sellos S2.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

- VII. Finalmente se acopla una pieza tipo PARTE 3 (ver Figura 67) en la que se han agregado dos válvulas para entrada y salida de gases. También se tuvieron en cuenta las conexiones C1 y C2 por medio de cables y finalmente a este acople se lo fijó a través de tuercas y se obtuvo de esta manera el prototipo final de STACK para uso en la aplicación del coche con dos pestañas de salida de potencial con su respectiva polaridad:

Fig. 78. Ensamble final de STACK.



Fuente: Diseñado en Autodesk Inventor. Creación propia.

3. CONCLUSIONES

- I. Se concluye haber obtenido un MEA funcional, el cual está caracterizado eléctricamente y fue elaborado mediante la técnica de prensado en caliente en el centro de investigación de materiales CIMA de la Universidad de Nariño,
- II. En consideración a las pérdidas encontradas en el prototipo de celda, gran parte fue debida a los pequeños desniveles propios de la técnica de impresión 3D empleada, los cuales no se acoplaron debidamente con los tubos plásticos que llegan del electrolizador.
- III. Después de realizar las evaluaciones eléctricas correspondientes y utilizar los métodos ya conocidos y mencionados con anterioridad, se concluye que el prototipo de celda de combustible con membrana de intercambio protónico obtuvo un punto de máxima densidad de potencia de 1.2386 mW/cm^2 equivalente al 87% de la celda comercial.
- IV. Es necesario profundizar en la etapa de control eléctrico de la celda, ya que se hace necesario desarrollar un circuito de acople para garantizar una máxima transferencia de energía a la carga.
- V. De acuerdo al funcionamiento de las aplicaciones didácticas, se determina que, para garantizar el correcto funcionamiento de una PEMFC, se debe propiciar el flujo continuo de los gases reactantes evitando estancamientos.

4. RECOMENDACIONES

- I. Debido a la naturaleza del presente proyecto se recomienda que para futuros trabajos en celdas de combustible tipo PEM, se requiere de la colaboración interdisciplinar de áreas como la Ingeniería Electrónica en el manejo de técnicas de construcción y la Química con el aporte teórico de funcionamiento.
- II. Continuar investigando en fuentes de energía renovables y limpias, ya que es un hecho que el prolongado uso de hidrocarburos ha afectado el medio ambiente, propagando la contaminación del mismo y promoviendo a la vez fenómenos como el calentamiento global.
- III. Construir un stack de celdas tomando como base la celda construida en este trabajo.
- IV. Probar la bala de hidrogeno *Hydrostik Pro*, que se puede adquirir comercialmente en *Fuel Cell Store*, ya que por su tamaño y capacidad seria la indicada para alimentar proyectos de baja potencia usando celdas de combustible tipo PEM.
- V. Continuar con la investigación de catalizadores que permitan reemplazar el platino y así abaratar los costos de producción de una celda de combustible tipo PEM.
- VI. Probar otras membranas de intercambio protónico que permitan reemplazar el Nafion, para abaratar costos en una producción en gran escala.
- VII. Instruirse en el manejo de técnicas de impresión en 3D más complejas como la impresión en plástico líquido, con el fin de mejorar la resolución de la impresión para el maquinado de diferentes prototipos.

BIBLIOGRAFÍA

BARBIR, F. "Pem fuel cells: Theory and practice", 2nd ed. Elsevier, 2013. p.1- 213.

BARCENAS, J., DUARTE, J., RAMIREZ, J. AND OROZCO, G. Protipado 3D en celdas de combustible tipo PEM utilizando ABS y recubrimiento conductor eléctrico. En: *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*. San Juan del Rio: (Septiembre 2017), p 46.

BARRERAS, F. " Design and manufacture of a high-temperature PEMFC and its cooling system to power a lightweight UAV for a high altitude mission". *Internationa Journal of Hydrogen Energy*, (2016, Noviembre 16), p. 1-10.

CABILDO, MARIA. "*Bases Químicas Del Medio Ambiente*". Madrid: Editorial UNED, 2013. pp 23-80.

CORTES MARIR, E. A., CIRO VELAZQUEZ, H. J., & MORENO CARDENAS, E. L. "Biocombustibles: búsqueda de alternativas". *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*. Medellín:(julio-diciembre, 2011), p. 118-123.

DELGADO, F. Estudio y modelización de una pila de combustible SOFC. Barcelona, 2017. TRABAJO DE GRAD (Grado en Ingeniería de la Energía). 179p. Universidad politecnica de cataluña.

ELSAYED, Y., WALAA, M. G., A.A, E., M.M., S., & K.M., E.-K. Design and modeling of bipolar plates for PEMFC by using consol software. *Global conference on global warming* p. 41-43.

ENRIQUE, F. Estado Actual del Hidrógeno Aplicado a Celdas de Combustible. Mexico, 2016. Universidad Nacional Autonoma de Mexico.

GRAY, HARRY. Electrones y enlaces químicos. Barcelona: Editorial Reverté s.a, 1978. 213p.

GARCIA, MIGUEL. *Estudio de factibilidad de una celda de combustible para aplicacion en autobuses urbanos*. Mexico D.F, 2015, 96p. Instituto Politecnico Nacional Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica unidad culhuacan.

GUTIÉRREZ, OMAR. Construcción y evaluación de una celda de combustible de intercambio protónico. Dyna. Medellin: (10 de Mayo, 2004), P.3c.

HERNANDEZ, OSCAR. Diseño y construccion de un stack de celdas tipo PEM. Mérida, 2011, 89p. Universidad Autónoma de Chapingo.

HSU, L. Polymer electrolyte fuel cell (PEMFC) based power system for long-term operation of leave-in-place sensors in Navy and Marine Corps applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. En: San Diego: 13 Sept, 2016.p. 1-4.

HU, M., & CAO, G. research on the performance differences between a standard PEMFC single cell and transparent PEMFC single cells using optimized transparent flow field until part II: Performance comparison and explanation. *Internationa journal of Hydrogen Energy*. (30 de Enero, 2016), p 2967-2980.

HYNOR PROJECT FOR H2 ROAD IN NORWAY. Fuel Cells Bulletin. Oslo:(8, August, 2005), p. 1.

JARAMILLO, S., & OCAMPO, S. *Diseño y construcción de las placas bipolares para una celda de combustible de membrana de intercambio protónico de hidrógeno*. Pereira, 2013, 91p. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica.

LEONE, P. *Advanced Methods of Solid Oxide Fuel Cell Modeling*. London: Springer, 2011. 218p.

MARTINEZ, R. *Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda*. Sevilla, 2016, 107p. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales. Universidad de Sevilla. Dep. de Ingeniería Energética.

MEJIA, J., & ALVAREZ, C. Determinación del costo de una flota de buses con celdas de combustible para el horizonte 2025 en el Valle de Aburrá. Medellín: Vol., 20. No 3 (Sep, 2015); pag. 1-8.

ORTIZ, D., SABOGAL, J., & HUERTADO, E. (2012, Septiembre). Una revisión a la reglamentación e incentivos de las energías renovables en Colombia. En: *Revista de la facultad de ciencias economicas*. Bogotá: 2 Dic, 2012, p.55.

QUIMICA, V. "Funcionamiento de una pila de combustible". {En línea}. {Febrero de 2010} disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=qTlirPZVEEE>.

R. BAKIYA, L., N.P., H., & A. VIMALA, J. Comparative analysis of 2D and 3D model of a PEMFC in COMSOL. En: *APSUSC*. Feb. 2017; p.1-10.

SAAVEDRA, F. E. Crisis ambiental y cambio climático en la política global: un tema crecientemente complejo para américa latina. En: *Universum Talca*. Vol.; 2. No 25(2010); p. 57-77.

SAJQURE, M., & KACHARE, B. Direct Methanol Fuel Cell: A Review. En: International Journal of Current Engineering and Technology. Vol.; 47. No 9(Oct.2016); p. 8-11.

SAUQUE, D. *Modelado y diseño de un sistema de refrigeración para una pila PEM de alta temperatura. Barcelona, 2016, 65p.* Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

TIBAQUIRA, J., & POSNER, J. Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. En: Scientia et Technica. Pereira:(13 Agosto, 2009), P.76.

TRIVIÑO, D. Development of a passive mini-direct ethanol fuel cell: Effect of MEA assembly parameters by hot pressure. En: Revista de Ciencias Universidad del Valle. Cali: 19 diciembre, 2013, P.97.

UDA, T., & HAILE, S. Thin Membrane Solid Acid Fuel Cell. En: Electrochemical and Solid-State Letters. Pasadena: March 24, 2005, P. A246.

YUYUN, I., INDRIYATI, & ACHIAR, O. Effect of hot pressing temperature on the performance of proton exchange membrane fuel cell based on gas diffusion electrode carbon paper and carbon cloth. En: *Indonesian journal of Materials Science. Vol.; 14. No 2(January.2012);p. 85-90.*